



UNIVERSIDAD CENTRAL "MARTA ABREU" DE LAS VILLAS
VERITATE SOLA NOBIS IMPONETUR VIRILISTOGA. 1948

Facultad de Ingeniería Eléctrica

Departamento de Telecomunicaciones y Electrónica



TRABAJO DE DIPLOMA

Propuesta de una Red Inalámbrica de Sensores para pequeñas y medianas empresas

Autor: Frank Alberto Manso Almaguer

Tutor: Dr. Félix Florentino Álvarez Paliza

Santa Clara

2016

"Año del 58 aniversario del triunfo de la Revolución"



Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas

Facultad de Ingeniería Eléctrica

Departamento de Telecomunicaciones y Electrónica



TRABAJO DE DIPLOMA

Propuesta de una Red Inalámbrica de Sensores para pequeñas y medianas empresas

Autor: Frank Alberto Manso Almaguer

E-mail: fmanso@uclv.cu

Tutor: Dr. Félix Florentino Álvarez Paliza

Profesor Titular

Departamento de Telecomunicaciones y Electrónica

Facultad de Ingeniería Eléctrica

E-mail: fapaliza@uclv.edu.cu

Santa Clara

2016

"Año del 58 aniversario del triunfo de la Revolución"



Hago constar que el presente trabajo de diploma fue realizado en la Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas como parte de la culminación de estudios de la especialidad de Ingeniería en Telecomunicaciones y Electrónica, se autoriza a que el mismo sea utilizado por la Institución, para los fines que esta estime conveniente, tanto de forma parcial como total y que además no podrá ser presentado en eventos, ni publicados sin autorización de la Universidad.

Firma del Autor

Los abajo firmantes certificamos que el presente trabajo ha sido realizado según acuerdo de la dirección de nuestro centro y el mismo cumple con los requisitos que debe tener un trabajo de esta envergadura referido a la temática señalada.

Firma del Autor

Firma del Jefe de Departamento
donde se defiende el trabajo

Firma del Responsable de
Información Científico-Técnica

PENSAMIENTO

“El futuro tiene muchos nombres. Para los débiles es lo inalcanzable. Para los temerosos, lo desconocido. Para los valientes es la oportunidad”.

Víctor Hugo.

DEDICATORIA

A mi madre, por dedicar toda una vida a enseñarme a andar por la vida y ser la razón por la que me esfuerzo cada día para ser mejor persona.

A mi hermano, por ser mi brazo derecho durante todo este tiempo de ausencia temporal de mi madre.

A mi padre, por estar siempre presente.

AGRADECIMIENTOS

A Osmar, porque durante todos estos años de carrera me ha brindado su apoyo desinteresado y ha sido como un tutor.

A Mailenys por brindarme su cariño y apoyo en toda esta etapa tan difícil que ha sido la tesis, a su familia por la buena acogida que me han dado.

A Jorge Alberto y familia por brindarme su amistad y acogerme como otro hijo.

A Laura, Patricia y todo su familión por tenerme siempre presente.

A mis siempre presentes Comunicadoras Sociales por brindarme su amistad y hacer mi tránsito por esta universidad más feliz y divertido.

A Juanita y las jefas de pasillo por haberme apoyado en todo momento.

A Lourdes que ha sido mi segunda madre en todo este tiempo que mi mamá no ha estado.

A mis amigos por haber compartido junto a mí todo este tiempo y aunque la distancia nos separe los tendré a todos presente.

A mis compañeros de aula durante estos 5 años.

A los profesores que me guiaron y prepararon como un futuro profesional.

TAREA TÉCNICA

1. Mencionar las aplicaciones de las redes WSN para pequeñas y medianas empresas
2. Selección del estándar de WSN a utilizar en pequeñas y medianas empresas.
3. Selección de la topología, banda de frecuencia y protocolo de enrutamiento a utilizar en aplicaciones WSN empresariales.
4. Determinación de los sensores a utilizar.
5. Evaluación del comportamiento o desempeño de la red para cada escenario en pequeñas y medianas empresas.
6. Analizar los resultados.
7. Elaboración del informe del Trabajo de Diploma.

Firma del Autor

Firma del Tutor

RESUMEN

El presente Trabajo de Diploma se enfoca en el diseño y análisis de una propuesta de Red Inalámbrica de Sensores (WSN) para pequeñas y medianas empresas propias de países en vías de desarrollo, ya que esta tecnología es muy implementada en los momentos actuales. Se describen los principales estándares para las Redes Inalámbricas de Sensores Industriales (IWSNs), los elementos de *hardware* y las aplicaciones de este tipo de redes. Para el diseño de estas redes se ha tomado como referencia el estándar Zigbee, la topología en malla, la banda de frecuencia de 2.4 GHz, el protocolo de enrutamiento Ad hoc On-demand Distance Vector (AODV) y los productos de la compañía *DOW TECHNOLOGY ELECTRONICS TRADING CO L.L.C.* Se hace uso de la herramienta OPNET Modeler 14.5 para analizar el desempeño a través de dos Casos de Estudio y se comparan los mismos teniendo en cuenta la demora y la carga general de la red.

Palabras claves: OPNET, Pequeñas y medianas empresas, WSN, ZigBee.

TABLA DE CONTENIDOS

PENSAMIENTO	i
DEDICATORIA	ii
AGRADECIMIENTOS	iii
TAREA TÉCNICA.....	iv
RESUMEN	v
TABLA DE CONTENIDOS	vi
INTRODUCCIÓN.....	1
CAPÍTULO 1. REDES WSN PARA APLICACIONES EMPRESARIALES.....	4
1.1 Características de las WSN.....	4
1.2 Estándares para IWSNs	6
1.2.1 Estándar Zigbee	7
1.2.2 Estándar WirelessHart	8
1.2.3 Estándar ANSI/ISA 100.11a.....	9
1.3 Estándares Ethernet Industriales.....	10
1.4 Elementos del hardware de las IWSNs.....	11
1.5 Aplicaciones de las IWSNs.....	12
1.6 Conclusiones del capítulo	15
CAPÍTULO 2. CRITERIOS DE DISEÑO DE WSN PARA APLICACIONES EMPRESARIALES.....	16
2.1 Selección del estándar.....	16

2.2 Selección de la topología de red a utilizar	18
2.3 Selección de la banda de frecuencia.	20
2.4 Selección del protocolo de enrutamiento.	21
2.5 Elementos de hardware para WSN en aplicaciones empresariales.....	23
2.6 Conclusiones del capítulo	25
CAPÍTULO 3. EVALUACIÓN DEL DESEMPEÑO DE IWSN MEDIANTE DIFERENTES CASOS DE ESTUDIO	27
3.1 Caso de Estudio 1: WSN para pequeñas empresas	27
3.1.1 Análisis de los resultados.....	30
3.2 Caso de Estudio 2: WSN para medianas empresas.....	34
3.2.1 Análisis de los resultados.....	35
3.3 Comparación entre el Caso de Estudio 1 y 2	38
3.4 Conclusiones del capítulo	40
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	41
Conclusiones	41
Recomendaciones	42
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	43
ANEXOS	45
Anexo I Hojas de Especificaciones de los Dispositivos	45
Anexo II Resultados secundarios de la simulación	51

INTRODUCCIÓN

Internet ha revolucionado la informática y las comunicaciones como ninguna otra cosa, es a la vez una herramienta de emisión mundial, un mecanismo para diseminar información y un medio para la colaboración y la interacción entre personas y sus ordenadores, sin tener en cuenta su ubicación geográfica. Internet representa uno de los ejemplos más exitosos de los beneficios de una inversión y un compromiso continuo en el campo de la investigación y el desarrollo de la infraestructura de la información (Lamarca, 2013).

Después de la red de redes y del Internet móvil, se está inmerso en una tercera, y potencialmente más disruptiva, fase: el llamado Internet de las Cosas (IoT). IoT hace referencia a un mundo conectado hasta el último extremo, donde objetos y seres físicos interactúan con entornos virtuales de datos en el mismo espacio y tiempo. Esto será posible usando la información extraída a través de millones de sensores que poblarán cada rincón de nuestro entorno y que podrán estar integrados en cualquier objeto de nuestra vida cotidiana. Su planificación y ejecución están dando ya sus primeros pasos (Gubbi et al., 2013).

Una Red Inalámbrica de Sensores (WSN) es un conjunto de dispositivos que reciben el nombre de nodos-sensores de bajo costo y mínimo consumo y se comunican entre sí, formando una red inalámbrica. Esta tecnología inalámbrica tiene sus inicios en la década de 1970 a partir de proyectos surgidos y consolidados en terreno militar (Pacheco Menéndez, 2015).

En la última década, el uso de las WSN ha crecido exponencialmente, logrando integrarse en una gran cantidad de áreas de aplicación. Algunas de las razones por las cuales ha logrado este importante crecimiento son: el bajo costo de despliegue de los nodos sensores, el bajo consumo de energía, la disponibilidad de nodos sensores multifuncionales, el

tamaño reducido de los sensores y la comunicación a corta distancia entre los mismos (LINO RAMIREZ, 2012).

Las WSN tienen gran aplicabilidad en esferas industriales como el control, la automatización, seguridad, sistemas de monitoreo, el ahorro de energía, etc. Estas aplicaciones son implementadas sobre estándares industriales, de los cuales los más utilizados son: Zigbee, WirelessHart y ANSI/ISA 100.11a, todos estos toman como punto de partida el estándar IEEE 802.15.4.

La tecnología de las Redes de Sensores Inalámbricas Industriales (IWSNs) está en plena evolución, por lo que hoy en día se desarrollan muchas investigaciones enfocadas en el mejoramiento de los estándares existentes y la implementación de nuevos, pues este tipo de tecnologías inalámbricas son de bajo costo y permiten el despliegue de redes eficientes.

Hasta el momento se han desarrollado diversidad de aplicaciones con las WSN, por lo que en este trabajo se realizará un análisis de las mismas en pequeñas y medianas empresas muy propias para países en vías de desarrollo.

En esta investigación se plantea como objetivo general:

- Proponer una Red Inalámbrica de Sensores para pequeñas y medianas empresas.

Para dar cumplimiento a este objetivo general se plantearon los siguientes objetivos específicos:

- Caracterizar las Redes Inalámbricas de Sensores para aplicaciones empresariales.
- Definir criterios para el diseño de Redes Inalámbricas de Sensores para aplicaciones empresariales.
- Evaluar el desempeño de diferentes Casos de Estudio mediante técnicas de modelado y simulación.

Para darle cumplimiento a los objetivos específicos presentados se plantearon las siguientes interrogantes científicas:

- ¿Qué características presentan las Redes Inalámbricas de Sensores en aplicaciones empresariales?

- ¿Qué criterios seguir en el diseño de una Red Inalámbrica de Sensores para aplicaciones empresariales?
- ¿Cuál es el desempeño de los diferentes Casos de Estudio evaluados mediante técnicas de modelado y simulación?

Con este proyecto se pretende ofrecer una propuesta de WSN para pequeñas y medianas empresas, así como incentivar a la enseñanza de estas nuevas tecnologías. A través de la ejecución del proyecto se dan soluciones a problemáticas como: el ahorro de energía, la eficiencia y la seguridad en las pequeñas y medianas empresas.

El trabajo queda estructurado en: Introducción, Capítulo 1, 2 y 3, Conclusiones, Recomendaciones, Referencias Bibliográficas y Anexos. Los temas que se abordan en cada capítulo se encuentran estructurados de la forma siguiente:

Capítulo 1: “Redes WSN para aplicaciones empresariales”, en este capítulo se definen algunas características de las WSN, así como los principales estándares y aplicaciones para WSN empresariales.

Capítulo 2: “Criterios de diseño de WSN para aplicaciones empresariales”, en este capítulo se definen los criterios a seguir para el diseño como: selección del estándar, topología, banda de frecuencia y protocolo de enrutamiento; además se proponen los elementos de *hardware* a utilizar.

Capítulo 3: “Evaluación del desempeño de IWSN mediante diferentes Casos de Estudio”, en este capítulo se evalúa el desempeño de dos Casos de Estudio mediante la herramienta OPNET Modeler 14.5 y se comparan entre ellos.

CAPÍTULO 1. REDES WSN PARA APLICACIONES EMPRESARIALES

En el presente capítulo se analizan las características de las WSN, así como los principales requisitos técnicos para su despliegue en ambientes industriales; además se caracterizan los principales estándares para IWSNs y Redes Ethernet Industriales. También se describen los elementos de hardware de las IWSNs, se presentan las principales esferas donde se aplican este tipo de redes, así como estas se pueden integrar a otras tecnologías.

1.1 Características de las WSN

Los recientes adelantos en las comunicaciones inalámbricas y la electrónica han propiciado el desarrollo de dispositivos de bajo costo, baja potencia, nodos multifuncionales de sensores, que son pequeños en tamaño y se comunican en cortas distancias. Estos diminutos nodos de sensores, los cuales permiten procesar datos y comunicar componentes, influyen la idea de redes de sensores. Las redes de sensores representan una significativa mejora por encima de los sensores tradicionales (Gungor and Hancke, 2009).

Una red de sensores está compuesta por un gran número de nodos sensores que están densamente desplegados dentro del fenómeno o cerca de él. La posición de los nodos sensores no necesita ser diseñada o predeterminada (Fata, 2011).

Las WSN consisten en un conjunto de nodos de pequeño tamaño, de muy bajo consumo y capaces de una comunicación sin cables, interconectados entre sí a través de una red y, a su vez, conectados a un sistema central encargado de recopilar la información recogida por cada uno de los sensores (Ramirez et al., 2011).

Una WSN se caracteriza por dispositivos de tamaño pequeño, y por la capacidad de monitorizar fenómenos ambientales a través de un conjunto de sensores, así como de enviar los datos a través de transmisores/receptores (LINO RAMIREZ, 2012).

Debido a las limitaciones de la vida de la batería, los nodos se construyen teniendo presente la conservación de la energía, y generalmente pasan mucho tiempo en modo durmiente (*sleep*) de bajo consumo de potencia.

Las WSN tienen capacidad de auto-restauración, es decir, si se avería un nodo, la red encontrará nuevas vías para encaminar los paquetes de datos. De esta forma, la red sobrevivirá en su conjunto, aunque haya nodos individuales que pierdan potencia o se destruyan (Dr. Peter Harrop, 2014).

Las redes de sensores inalámbricos embebidos (EWSNs) consisten en nodos de sensores con sensores incorporados para detectar datos sobre un fenómeno, estos nodos sensores se comunican con los nodos sensores vecinos sobre enlaces inalámbricos. Las EWSNs de un solo núcleo serían incapaces de satisfacer las crecientes necesidades de aplicaciones de gran volumen de información (por ejemplo, redes de sensores de video), por lo que los nodos de sensores de nueva generación deben poseer capacidades de computación y comunicación mejoradas (ABDUL KAREEM SHAIK, 2015).

Las IWSNs surgen como una alternativa a las redes cableadas ya existentes, propiciando que su implementación redujera los costos de instalación, con estas redes se puede controlar, monitorizar y responder ante diferentes fenómenos desde un controlador central remoto.

En estos momentos el desarrollo existente ha permitido que un hogar, una oficina o un local cualquiera pueda convertirse en una pequeña o mediana empresa desde la cual se monitoree, controle y dirijan procesos internos o externos a la misma; por lo que a lo largo de esta investigación cuando se refieran a IWSNs dentro de las mismas se incluirán elementos válidos para las pequeñas y medianas empresas.

Los principales desafíos técnicos para la realización de IWSNs son: (Gungor and Hancke, 2009)

- Recursos limitados: El diseño e implementación de IWSNs se ven limitados por tres tipos de recursos: la energía, la memoria, y el procesamiento.
- Topologías dinámicas: En entornos industriales, la topología puede variar debido a fallos del nodo sensor, los sensores también pueden estar sujetos a la interferencia de RF.
- Condiciones ambientales adversas: existen ambientes altamente corrosivos o cáusticos, altos niveles de humedad, vibraciones, polvo y suciedad, u otras condiciones que desafían el rendimiento.
- Seguridad: La seguridad debe ser una característica esencial en el diseño de IWSNs para mantener la comunicación a salvo de ataques externos.
- Integración con Internet y otras redes: Es de fundamental importancia para el desarrollo comercial de IWSNs ofrecer servicios que permitan la consulta de la red para recuperar información útil desde cualquier lugar y en cualquier momento. Las IWSNs deben ser accesibles de forma remota a través de Internet y, por lo tanto, necesitan ser integradas con la arquitectura de Protocolo de Internet (IP). Las plataformas de sensor de red actuales utilizan puertas de enlace para la integración entre IWSNs y la Internet. Además estas redes deben integrarse a una infraestructura ya existente y coexistir con ella, por lo que deben estar equipadas para lograrlo.

1.2 Estándares para IWSNs

Estándar IEEE 802.15.4

El estándar IEEE 802.15.4 es la base para otros estándares utilizados en la industria, en él se define las características de la capa física y de la capa de control de acceso al medio (MAC) para redes inalámbricas de área personal (WPAN) de baja tasa de transmisión. Por otro lado, el estándar IEEE 802.15.4 permite proporcionar un tiempo de vida razonable al utilizar fuentes de energía limitada y al mismo tiempo proporciona una pila de protocolos simples (Moreno and Ruíz, 2007).

En el IEEE 802.15.4 se definen 27 canales de frecuencia entre las tres bandas 868/915/2400 MHz. La capa física de los 868/915 MHz soporta un solo canal entre los 868 y los 868.6 MHz, y diez canales entre los 902.0 y 928.0 MHz. Debido al soporte regional de esas dos bandas de frecuencias, es muy improbable que una sola red utilice los 11 canales. Sin embargo, las dos bandas se consideran lo suficientemente cercanas en frecuencia que se puede utilizar el mismo hardware para ambos y así reducir costos de manufactura. La capa física de los 2.4 GHz soporta 16 canales entre los 2.4 y los 2.4835 GHz con un amplio espacio entre canales de 5 MHz, esto con el objetivo de facilitar los requerimientos de filtrado en la transmisión y en la recepción (Moreno and Ruíz, 2007).

En la Tabla 1.1 se muestra un resumen de las principales características de este estándar.

Propiedad	Rango
Rango de transmisión de datos	868 MHz: 20kb/s; 915 MHz: 40kb/s; 2.4 GHz: 250 kb/s.
Alcance	10 – 20 m.
Latency	Abajo de los 15 ms.
Canales	868/915 MHz: 11 canales. 2.4 GHz: 16 canales.
Bandas de frecuencia	Dos PHY: 868/915 MHz y 2.4 GHz.
Direccionamiento	Cortos de 8 bits o 64 bits IEEE
Canal de acceso	CSMA-CA y rasurado CSMA-CA
Temperatura	El rango de temperatura industrial: -40° a +85° C

Tabla 1.1. Características del estándar IEEE 802.15.4 (Moreno and Ruíz, 2007).

1.2.1 Estándar Zigbee

ZigBee es un conjunto de protocolos de alto nivel de comunicación inalámbrica. Su objetivo son las aplicaciones que requieren comunicaciones seguras con baja tasa de envío de datos y la maximización de la vida útil de sus baterías. El primer perfil se declaró a mediados de 2003, se definieron especificaciones globales de aplicaciones inalámbricas fiables, económicas y de baja potencia basadas en la norma IEEE 802.15.4 (Muñoz Castejón, 2011).

Fue un proyecto formado por seis promotores (Honeywell, Invensys, Mitsubishi, Motorola, Philips, y Samsung) y más de 80 participantes.

El estándar Zigbee opera en las bandas libres ISM de 868/915/2400 MHz, con velocidades de transmisión entre 25-250 kbps, un rango de cobertura de 10 a 75 metros. A pesar de coexistir en la misma frecuencia con otro tipo de redes como WiFi o Bluetooth su desempeño no se ve afectado, esto es debido a su baja tasa de transmisión y, a características propias del estándar IEEE 802.15.4.

Zigbee es fiable, la red se organiza y se repara de forma automática y se enrutan los paquetes de manera dinámica. Se puede establecer comunicación entre dos nodos aun cuando estos se encuentren fuera del rango de transmisión, siempre y cuando existan otros nodos intermedios que los interconecten; de esta manera, se incrementa el área de cobertura de la red.

Su topología en malla (MESH) permite a la red auto-recuperarse de problemas en la comunicación aumentando su confiabilidad; es un protocolo seguro ya que se puede implementar la encriptación y la autenticación (Salgado, 2012).

Los servicios de seguridad proporcionados por ZigBee incluyen métodos para establecimiento de claves, transporte de claves, protección de tramas y administración de dispositivos. Utiliza encriptación AES-128.

1.2.2 Estándar WirelessHart

Desarrollado por HART Communication Foundation. Utiliza radios compatibles con IEEE 802.15.4, su principal argumento es su capacidad de auto-organización, desarrollando redes muy robustas frente a caídas de nodos y con una gran flexibilidad.

A diferencia de las redes de sensores genéricas, que asumen que los sensores son desplegados al azar y de manera abundante, el despliegue de las redes WirelessHART es preciso y con redundancia limitada. Los nodos WirelessHART están conectados a dispositivos de campo para recolectar datos ambientales específicos de los procesos, por ejemplo: velocidades de flujo, niveles de fluido, o temperaturas (Garbarino and Echeverria, 2011).

Los radios utilizados en las redes WirelessHart operan en la banda de 2.4 GHz y emplean el espectro extendido por secuencia directa (DSSS) y modulación OQPSK. Las comunicaciones son sincronizadas mediante Acceso Múltiple por División de Tiempo (TDMA), el cual tiene la ventaja que cada dispositivo tiene su turno sin ninguna interrupción, reduciendo los problemas de latencia y aumentando la utilización del ancho de banda.

La comunicación se realiza de forma programada a través de las diferentes rutas redundantes definidas previamente por parte del administrador de red, basándose en la latencia, eficiencia y fiabilidad. Para evitar que las rutas no se cierren y se saturen, los mensajes se alternan continuamente entre las diferentes rutas. Tienen implementada la protección ante la interferencia mediante la implementación de lista negra (blacklist) de canales, esta lista contiene los canales que son afectados por interferencias, de este modo, el administrador de la red puede desactivar completamente estos canales. Utiliza claves simétricas basadas en AES-128.

1.2.3 Estándar ANSI/ISA 100.11a

ANSI/ISA 100.11a forma parte de un grupo de estándares diseñados especialmente bajo criterios como: flexibilidad, soporte múltiples protocolos, uso de estándares abiertos, soporte múltiples aplicaciones, fiabilidad (detección de errores, salto de canal), determinismo (TDMA, soporte QoS) y seguridad; con el objetivo de soportar un amplio rango de necesidades de plantas inalámbricas industriales, incluyendo automatización de procesos y automatización de fabricación (Muñoz Castejón, 2011). Su arquitectura está basada en un *router* troncal, a partir del cual se despliegan múltiples subredes.

La capa física está basada en el estándar IEEE 802.15.4 en la banda de 2.4 GHz, que emplea DSSS y modulación OQPSK, sus capas de red y transporte en 6LoWPAN, IPv6 y estándares UDP. La capa de enlace de datos es única para ISA 100.11a y usa una forma de la capa MAC IEEE 802.15.4 que no se ajusta a las especificaciones. La capa de enlace de datos implementa enrutamiento gráfico, salto de frecuencias y la multiplexación por división de tiempo. Soporta claves simétricas y asimétricas AES-128, utiliza *blacklist* para la protección ante la interferencia.

1.3 Estándares Ethernet Industriales.

Modbus: primer protocolo industrial sobre Ethernet, es un estándar abierto y relativamente simple el cual no requiere licencia. Este protocolo de comunicación serial seguro está basado en el modelo maestro/esclavo, utiliza como método de acceso al medio CSMA/CD lo que implica probabilidad de colisión. Existen dos variantes Modbus RTU que es una representación binaria para la transmisión de datos y Modbus ASCII donde la comunicación se realiza mediante caracteres ASCII (Ramírez, 2014).

EtherCat: estándar abierto de bajo costo y extremadamente eficiente. Sus tasas de transmisión son de hasta 100 Mbps con bajas demoras basadas en el modelo maestro/esclavo; usa la trama del estándar IEEE 802.3 para la transmisión. Es posible desarrollar las topologías de árbol, estrella y lineal. Es posible el uso de encapsulación UDP (Orfanus et al., 2013).

PROFINet: estándar abierto de la asociación internacional de PROFibus de alto rendimiento, el cual permite una cantidad ilimitada de nodos y es sencillo de manejar. La transmisión es full duplex en paralelo mediante una estructura de red uniforme con una integración homogénea de los sistemas de bus de campo, en la que se reduce el número de interfaces. Utiliza TCP/IP permitiendo monitorizar los fenómenos en tiempo real, se pueden desplegar topologías de anillo, árbol, estrella y lineal. Permite comunicación con WLAN industriales facilitando la realización de actualizaciones de software de forma remota (ESCÁMEZ SÁNCHEZ, 2014).

Ethernet/IP: estándar abierto para la conexión de redes industriales que aprovecha los medios físicos y los dispositivos de comunicaciones de Ethernet comerciales. Usa la capa de transporte de Ethernet (TCP y UDP), el uso de TCP trae ventajas como la sincronización de datos y eficiencia, mientras que UDP posibilita el transporte rápido de datos si este está bien configurado, sino puede sobrecargar la red. La transmisión se realiza full duplex y puede ser en tiempo real basada en el modelo maestro/esclavo, la topología en estrella es la más utilizada. Los dispositivos se pueden configurar desde una ubicación centralizada (Cantos Silva and Guevara López, 2014).

Las redes Ethernet Industriales se ven afectadas debido a golpes y vibraciones, extremas temperaturas y ambientes corrosivos por lo que se recomienda el uso de par trenzado

apantallado (STP), cable coaxial o fibra óptica, en las zonas de altas interferencias como la presencia de motores donde el ruido pueda afectar la comunicación. Estas redes se separan en subredes para evitar que los errores en unos afecten a otros; se recomienda que la carga de tráfico sea de menos del 10 % aunque en la práctica operan entre un 3% ó 4%, además la red de oficina se separa de la red industrial para evitar demoras. La disminución de la carga de tráfico se logra transmitiendo cuando los sensores cambien de estado.

1.4 Elementos del hardware de las IWSNs

Un nodo IWSN integra, recogida de detección y tratamiento de datos y comunicaciones inalámbricas, junto con una fuente de alimentación conectada en un solo chip. La arquitectura de hardware de un nodo típico sensor industrial se compone de cuatro componentes básicos (Gungor and Hancke, 2009):

- **Sensor:** Los sensores son dispositivos de hardware que producen respuesta medible a un cambio en una condición física, por ejemplo, temperatura, presión, tensión, corriente, etc. Las señales analógicas producidas por los sensores basados en el fenómeno observado se convierten en señales digitales por el convertidor analógico-digital y se envía al procesador para procesamiento adicional. Varias fuentes de consumo de energía en los sensores son los siguientes: 1) muestreo de la señal y la conversión de las señales físicas a las eléctricas; 2) acondicionamiento de señal; y 3) conversión analógico-digital.
- **Procesador:** La unidad de procesamiento, que generalmente se asocia con una unidad de almacenamiento pequeña, realiza tareas, procesa los datos, y controla el funcionamiento de otros componentes en el nodo sensor.
- **Transceptor:** Una unidad que conecta el nodo a la red. En general, las radios utilizadas en los transceptores de nodos de sensores industriales operan en cuatro modos diferentes: 1) transmitir; 2) recibir; 3) inactivo; y 4) dormir.
- **Fuente de energía:** Uno de los componentes más importantes de un nodo sensor industrial es la fuente de energía. En las redes de sensores, el consumo de energía se divide generalmente en tres dominios: detección, procesamiento de datos y comunicación. En la detección y procesamiento de datos se requiere mucha más energía que para la comunicación de datos en un nodo sensor típico. Por lo tanto, el

procesamiento de datos local es crucial para reducir al mínimo el consumo de energía en IWSNs.

1.5 Aplicaciones de las IWSNs

Medio Ambiente: Monitorizar especies en extinción, detectar y prevenir incendios forestales, además en ciudades se monitoriza los niveles de contaminación de la atmósfera y recogen datos sobre el clima, con el fin de mantener un desarrollo sostenible.

Agricultura: Combinando sensores como humedad, temperatura y luminosidad se pueden detectar riesgo de heladas, posibles enfermedades de las plantas o la necesidad de riego según el nivel de humedad de la tierra, entre otras.

Salud: Seguimiento a pacientes, monitorizar deportistas en el terreno de juego para evaluar su desempeño.

Automatización industrial: Las aplicaciones de automatización industrial proporcionan un control, conservación, eficiencia y seguridad, de la siguiente manera: reduciendo los gastos de energía a través de los procesos de fabricación optimizados; utilizando aplicaciones de detección que ayuden a identificar un funcionamiento ineficiente o equipos de bajo rendimiento; automatizando la adquisición de datos de sensores remotos para reducir la intervención del usuario; desplegando redes de vigilancia para mejorar la seguridad pública y de los empleados. Durante este despliegue se tiene que tener en cuenta la red de comunicaciones ya existente y lograr integrar la nueva propuesta a la ya existente.

Automatización de edificios: es posible controlar el consumo de energía de un hotel, un parámetro importante, debido a que la energía es un gasto operativo importante para un hotel; para garantizarlo se desarrolla un sistema de gestión centralizado que permita a los operadores de los hoteles asegurarse de que las habitaciones vacías no se enfríen. Desplegar redes de monitoreo inalámbrico para mejorar la protección del perímetro. En la Figura 1.1 se muestra los diferentes elementos que se pueden monitorizar mediante la automatización de edificios.



Figura 1.1. Servicios que pueden ser contralados mediante la automatización de edificios (Becerra, 2013).

Domótica: Automatizar tareas cotidianas en el hogar y tener controlado un hogar mediante sensores; proporcionando un ahorro energético, garantizando la seguridad y el bienestar dentro del hogar.

Las aplicaciones de control para el hogar proporcionan el control, la conservación, la comodidad y la seguridad mediante una gestión flexible de la iluminación, calefacción y sistemas de refrigeración desde cualquier lugar en el hogar; automatizando el control de varios sistemas domésticos; captura de datos muy detallados como consumo de agua y de servicios públicos como gas y electricidad. En la Figura 1.2 se muestra los servicios que se pueden controlar en un hogar.

1.6 Conclusiones del capítulo

Las WSN son una tecnología basada en la transmisión de datos de forma segura utilizando razones de transmisión de hasta 250 kbps, posibilitan un aumento en la vida útil de las baterías.

Las IWSNs se desarrollan tomando como base al estándar IEEE 802.15.4. El estándar Zigbee es el utilizado para este tipo de tecnología; estas redes pueden integrarse a otras redes ya existentes como WiFi y Ethernet.

Las IWSNs se aplican en esferas como: la agricultura, la salud, el medio ambiente, la automatización industrial y de edificios y la domótica.

CAPÍTULO 2. CRITERIOS DE DISEÑO DE WSN PARA APLICACIONES EMPRESARIALES

En el presente capítulo se definen criterios que se deben tener en cuenta para el diseño de una WSN para aplicaciones empresariales; los elementos que se tienen en cuenta son: el estándar, la topología, la banda de frecuencia, el protocolo de enrutamiento y los elementos de *hardware*. El estándar a utilizar es Zigbee, teniendo a este como base se seleccionan los demás criterios.

Para la selección de los diferentes parámetros a tener presente durante el diseño de una WSN para aplicaciones empresariales, se partirá de que los elementos elegidos permitan un producto final que garantice ser eficiente. Las WSNs para aplicaciones empresariales que se diseñen siguiendo estos criterios se pretende que sean operativas y funcionales, donde se garantice el control sobre los elementos a monitorizar.

2.1 Selección del estándar

Una adecuada selección del estándar a utilizar permite que el posterior diseño cumpla con los requerimientos que se deseen. En aplicaciones para pequeñas y medianas empresas se necesita de un diseño funcional en donde se tenga el control sobre los principales parámetros. Se debe tener presente que en este tipo de redes lo importante es la operatividad de la misma, por lo que no se necesita una gran robustez en cuanto a despliegue y seguridad, sino que permita que sean eficientes.

En el epígrafe 1.2 se describieron los principales estándares para IWSN, en la Tabla 2.1 se muestra en resumen de algunas de sus características.

	Zigbee	WirelessHart	ANSI/ISA 100.11a
Arquitectura	Variable	Precisa	Precisa
Acceso al Medio	CSMA-CA	TDMA	TDMA
Banda de frecuencia	868/915/2400 MHz	2.4 GHz	2.4GHz
Topologías	Estrella, malla, árbol de grupo	Estrella, malla, árbol de grupo	Estrella, malla, árbol de grupo
Seguridad	AES-128	AES-128, Claves simétricas	AES-128, Claves simétricas y asimétricas
Robustez	Robusto	Muy robusto	Muy robusto

Tabla 2.1. Características de los estándares para IWSNs.

El estándar seleccionado para redes de sensores inalámbricas en pequeñas y medianas empresas según los criterios que se siguieron es Zigbee, el mismo transmite a bajas razones dándole una vida mayor a sus baterías, permite que su arquitectura sea variable en dependencia de las características y exigencia de lo que se desee monitorizar, permitiendo una rápida instalación. Utiliza bandas de frecuencias libres, por las que no hay que pagar por su uso. Garantiza la seguridad aunque en entornos donde esta sea un elemento vital no se recomienda. Varios fabricantes implementan Zigbee en sus productos por lo que son fáciles de adquirir en el mercado. Por su parte WirelessHart y ANSI/ISA 100.11a son mucho más exigentes en sus diseños, con arquitecturas bien definidas, permitiendo redes de mayor robustez y donde la seguridad es muy importante. Zigbee se adapta mucho mejor a las exigencias tenidas como premisas para el diseño.

2.2 Selección de la topología de red a utilizar

Se debe partir de que la topología a seleccionar será para desarrollarla sobre el estándar Zigbee, primeramente se definirá qué son los dispositivos de funcionalidad completa (FFD) y dispositivos de funcionalidad reducida (RFD).

Un FFD se le da la capacidad de implementar una función completa en la pila del estándar IEEE 802.15.4, lo que hace que sea capaz de convertirse en el coordinador de red de área personal (PAN), posibilitando que puedan iniciar y gestionar toda la red. Esto incluye el establecimiento de la red y la aceptación de la asociación de las peticiones de otros dispositivos.

Un RFD es un dispositivo, que puede implementar las funciones básicas de la pila, es decir, una implementación mínima del protocolo IEEE 802.15.4. Un RFD no se puede utilizar para iniciar y gestionar una red, pero puede ser utilizado para ejecutar tareas muy simples. El uso común de la RFD es conectar a los sensores y regularmente enviar las lecturas del sensor a la red. Un RFD sólo puede comunicarse con un FFD.

La Figura 2.1 muestra las topologías en estrella, malla y árbol de grupos que son las más utilizadas en las redes Zigbee.

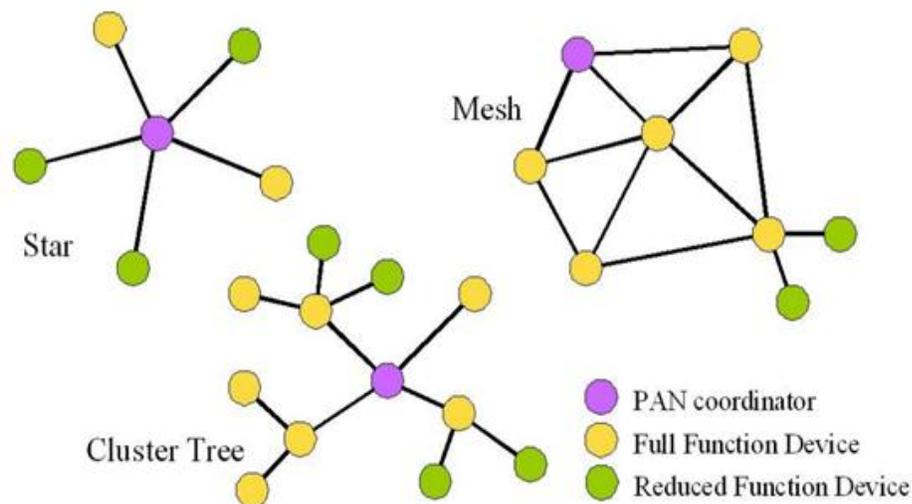


Figura 2.1. Topologías de red usadas por el estándar Zigbee (Moreno and Ruíz, 2007).

Topología en estrella (Star)

La comunicación se establece entre los dispositivos y un nodo controlador central, llamado coordinador PAN. En consecuencia, para enviar un paquete de un equipo a otro, este debe pasar a través del coordinador para enviar el paquete hacia el destino. El coordinador PAN puede estar conectado a una red de alimentación, mientras que los dispositivos pueden estar alimentados por baterías.

Las desventajas de la topología en estrella es que no hay rutas alternas, si el enlace entre el coordinador y el dispositivo final falla se pierde la comunicación entre ellos, todos los paquetes deben pasar a través del coordinador, este último puede haberse saturado con un gran número de paquetes y como resultado, se tiene una red congestionada. La ventaja que presenta esta topología es que la comunicación se establece de forma directa entre el dispositivo final y el coordinador, por lo que la comunicación es más segura (Kaoutar et al., 2014).

Las aplicaciones que se pueden beneficiar de esta topología son domótica, periféricos de ordenador y juguetes.

Topología en malla (Mesh)

En la topología en malla existe también un coordinador PAN. A diferencia de la topología estrella, cualquier dispositivo se puede comunicar con cualquier otro dispositivo que esté dentro de su rango de alcance. Permite múltiples saltos para encaminar los mensajes desde cualquier dispositivo a otro dispositivo dentro de la red, proporcionando de esta manera confiabilidad en el encaminamiento multi-salto. Una red en malla se puede auto-organizar; existe redundancia en las rutas por lo que si un enlace se cae, la información puede ser enviada por otra ruta existiendo gran escalabilidad.

Las principales desventajas radican en la complejidad del sistema, la redundancia de las rutas empeora la latencia de la red y es alta la cantidad de colisiones (Kaoutar et al., 2014).

Entre las aplicaciones que pueden hacer uso de esta topología se encuentran aplicaciones de control y monitorización industrial, WSN.

Topología en árbol de grupos (Cluster tree)

La topología en árbol de grupos es un caso especial de las redes en malla, en la que la mayoría de los dispositivos son FFDs; un RFD se puede conectar a la red en árbol como un nodo hoja al final de la rama. Cualquiera de los FFDs puede actuar como coordinador y proporcionar servicios sincronizados tanto a otros dispositivos como a coordinadores.

La desventaja de esta topología es que no hay camino alternativo si el enlace necesario para alcanzar el destino falla, la inclusión de una gran cantidad de enrutadores puede encarecer la red (Kaoutar et al., 2014).

La topología que se seleccionará es la topología en malla, esta permite que exista redundancia en las rutas, lo que aumenta la fiabilidad de la red, pues una vez que un enlace se rompa, la información puede enviarse por otro camino, teniendo la posibilidad de auto-organizarse. Por su parte la topología en árbol de grupos si se cae la comunicación entre el coordinador y un *router* no habrá intercambio de información en esa parte de la red hasta que el mismo vuelva a entrar en funcionamiento. La topología en malla garantiza la flexibilidad de la red, aunque una alta redundancia en la malla encarece la red y aumenta latencia.

2.3 Selección de la banda de frecuencia.

El estándar Zigbee opera en las bandas de frecuencias de 869/ 915/ 2400 MHz; la banda de los 869 MHz es solo libre en Europa mientras que 915 MHz lo es en Estados Unidos, por tal motivo se utilizará la banda de los 2.4 GHz, esta parte del espectro de frecuencia no requiere el uso de una licencia gubernamental para su uso en la mayoría de regiones del mundo, proporcionando disponibilidad global. Posee un ancho de banda de 83.5 MHz, lo suficientemente amplio como para la mayoría de aplicaciones WSN. Cuenta con las mejores características de propagación disponibles para bandas sin licencia internacionales.

Esta banda de frecuencia es también utilizada por el estándar IEEE 802.11 por lo que deben coexistir ambos estándares. El estándar IEEE 802.15.4 para 2.4 GHz define 16 canales que son separados 5 MHz unos de otros, con un ancho de banda de cada canal de 2 MHz; mientras que la norma IEEE 802.11b define 14 canales dentro de la banda de 2.4 GHz, con una distancia de 5 MHz entre dos canales adyacentes. Dado que la señal de radio WLAN

tiene un ancho de banda de 22 MHz, no todos los canales se pueden utilizar al mismo tiempo (Tustón Torres, 2012).

En la Figura 2.2 se muestra que los canales que se pueden utilizar simultáneamente sin interferencia son el 15, 20, 25 y 26 de IEEE 802.15.4; los problemas de coexistencia no pueden ser eliminados, pero los efectos pueden estar limitados por el uso de una combinación de técnicas de reducción llamadas técnicas de diversidad.

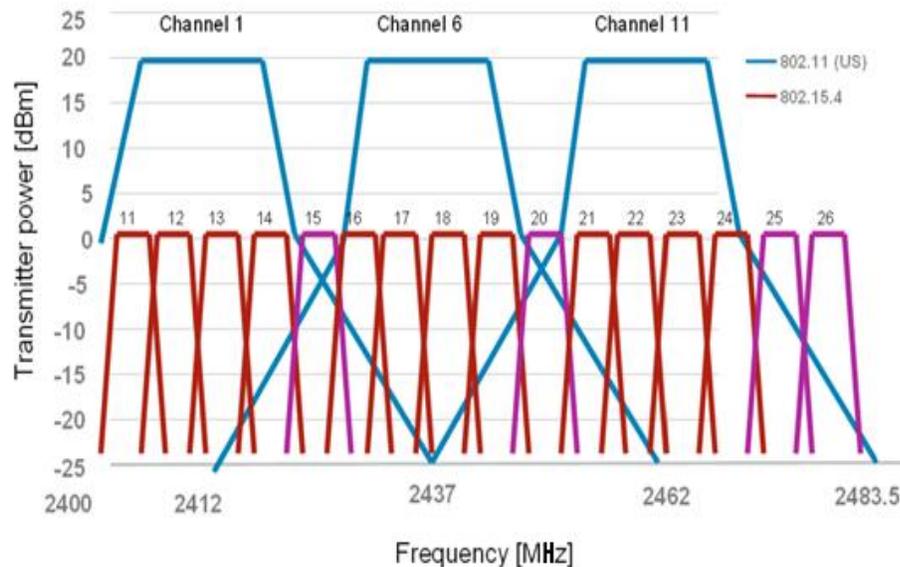


Figura 2.2. Coexistencia de los estándares 802.11 y 802.15.4 en la banda de los 2.4 GHz (Tustón Torres, 2012).

2.4 Selección del protocolo de enrutamiento.

Para la selección del protocolo de enrutamiento primero se clasificarán los protocolos teniendo en cuenta el mecanismo utilizado para encontrar la ruta hasta el destino (Gaber et al., 2015):

- Protocolos proactivos: se envía información de encaminamiento periódicamente para que en cualquier momento cualquier nodo pueda comunicarse con cualquier otro de la red. Esta característica proporciona una rápida respuesta ante solicitudes de ruta y ofrece un buen comportamiento en situaciones donde la tasa de movilidad es alta. Sin embargo, la sobrecarga que se introduce en la red con información de control es alta y aumenta el consumo energético.

- Protocolos reactivos: solo crean rutas cuando es necesario, son protocolos de baja demanda donde la sobrecarga es mucho menor, pero los retrasos de establecimiento de rutas son mayores.

Los principales protocolos utilizados son:

Ad hoc On-demand Distance Vector (AODV)

Es un ejemplo de los protocolos de enrutamiento reactivos basado en el vector distancia que utiliza un enfoque por peticiones para encontrar y establecer rutas. Se utiliza esencialmente para redes ad-hoc móviles, que se caracterizan por cambios frecuentes de conectividad debido al posible movimiento de los nodos; pero es ampliamente utilizado en WSNs. AODV mantiene rutas, siempre y cuando se necesiten por los nodos de origen, se considera uno de los mejores protocolos de enrutamiento que establecen el camino más corto y de menos potencia consumida. En AODV, cada nodo se comporta como un enrutador especializado y las rutas se crean bajo demandas, solo cuando realmente se necesita para enviar datos entre un origen y un nodo de destino. Cada vez que un nodo de origen no tiene una ruta válida en su tabla de enrutamiento al destino o una ruta previamente válida expira, el nodo de origen inicia un proceso de descubrimiento de ruta mediante la difusión de un paquete de petición de ruta (RREQ) a sus vecinos.

Dynamic Source Routing (DSR)

Es un protocolo de enrutamiento reactivo que se comporta similar a AODV mediante el descubrimiento y mantenimiento de ruta. En el protocolo DSR, el nodo de origen conoce la ruta completa al nodo de destino, ya que utiliza la técnica de direccionamiento de origen, donde las rutas se almacenan en una memoria caché de ruta. No requiere ningún tipo de mensajes periódicos (reactivo), disminuyendo así la sobrecarga con mensajes de control. Los paquetes de datos llevan en el encabezado del paquete la ruta de origen, un nodo que desee enviar un paquete de datos buscará en su caché de ruta para ver si ya tiene una ruta hacia el destino. Si no hay una ruta válida en la memoria caché, el emisor inicia un procedimiento de descubrimiento de ruta por inundación de un paquete de petición de ruta a través de la red, cada nodo que recibe un paquete RREQ inserta su propia dirección en el paquete de petición antes de volver a transmitir, a no ser que sea el destino o si este tiene

una ruta hacia el destino en su caché ruta. Por lo tanto, el nodo responde al paquete RREQ con un paquete de respuesta de ruta (RREP) que se devuelve a la fuente original.

Optimized Link State Routing (OLSR)

Es un ejemplo de los protocolos de enrutamiento proactivos donde las rutas ya están disponibles en la tabla de rutas por lo que no se pierde tiempo en el descubrimiento de la misma. OLSR se basa en el estado del enlace y se caracteriza por dos tipos de mensajes de control: el primer tipo son los mensajes de control de la topología que se envían a todos los otros nodos en la red, lo que les permite obtener un mapa topológico completo de la red permitiendo conocer la ruta a cualquier nodo destino dentro de la red; el segundo tipo son los mensajes *HELLO* que se utilizan para obtener la información de estado de enlace mediante el uso de sensores vecinos para identificar sus vecinos y determinar información acerca de su vecindario en los próximos dos saltos. Solo los nodos seleccionados llamados retransmisores multipunto (MPRs) se utilizan para transmitir información de la topología a través de la red durante el proceso de inundación, en lugar de permitir que cada nodo transmita mensajes de su topología. La ventaja del protocolo OLSR es que tiene menos retardo extremo a extremo y el retardo tiene una distribución más amplia por lo que es adecuado para aplicaciones de tiempo críticas. OLSR tiene la desventaja de mantener constantemente actualizadas las tablas de enrutamiento, lo que lleva a un alto consumo de las baterías.

El protocolo de enrutamiento a utilizar es AODV pues al ser un protocolo reactivo la vida útil de las baterías es mucho mayor, este protocolo establece el camino más corto y de menos potencia consumida; para el descubrimiento de las rutas se basa en peticiones a sus vecinos y las mismas son mantenidas a menos que expiren. En (Gaber et al., 2015) se recomienda el uso de este protocolo de enrutamiento para WSN.

2.5 Elementos de hardware para WSN en aplicaciones empresariales

La selección de los elementos de hardware es bastante complicada, pues existe hoy en día una gran diversidad de fabricantes por todo el mundo. La selección se debe realizar teniendo en cuenta los criterios de diseño que se plantearon como premisas para aplicaciones en pequeñas y medianas empresas.

DOW TECHNOLOGY ELECTRONICS TRADING CO L.L.C es una compañía que entre sus líneas se encuentra la producción de hardware para el monitoreo y control, adecuado para pequeñas y medianas empresas. Los dispositivos son de buena calidad y relativamente baratos, los mismos son de fácil adquisición en el mercado y rápida instalación. A continuación se describen una serie de dispositivos de hardware propios de esta compañía, en conjunto pueden ser utilizados para el despliegue de WSN adecuadas para pequeñas y medianas empresas.

WZB-05ET Coordinator ZigBee – Convertidor a Ethernet: Este es el dispositivo central que permite la conexión entre la red ZigBee de sensores y la red Ethernet. Utiliza la banda de 2.4 GHz; admite las topologías en estrella, malla y árbol de grupos. Este dispositivo es muy utilizado en la automatización de edificios y domótica, también para el control y monitoreo industrial.

WZB-01USBR Router ZigBee o Repetidor mediante USB: Este es un dispositivo que proporciona comunicaciones inalámbricas ZigBee totalmente compatibles con los *routers*, los coordinadores y los dispositivos finales, se utiliza como repetidor con el objetivo de ampliar el área de comunicaciones. Trabaja en la banda de 2.4 GHz; este dispositivo es totalmente compatible con todas las topologías ZigBee inalámbricas (árbol de grupos, estrella y malla) y puede coordinar hasta 31 sensores ZigBee diferentes. Es adecuado para la automatización de edificios y domótica, también para el control y monitoreo industrial.

SG-01-SK Detector de Humo Fotoeléctrico Residencial: Este es un dispositivo susceptible a la amenaza de fuego que ofrece protección fiable para todos los entornos domésticos; utiliza para la comunicación Zigbee en la banda de 2.4 GHz y la fuente de alimentación es por baterías (3V - DC).

WZB-SGB02 Detector de Rotura de Cristal: Es un dispositivo final compatible con ZigBee y que puede comunicarse con *routers* y coordinadores; es fácilmente instalado y usado como parte de sistemas de seguridad; utiliza baterías de Litio a su interior.

WZB-SPM05 Detector de Movimiento PIR: Funciona como un dispositivo final y es compatible con Zigbee, puede comunicarse con *routers* y coordinadores; utiliza la banda de

2.4 GHz; es fácilmente instalado y usado como parte de sistemas de seguridad; utiliza baterías a su interior (3 V - DC).

A10 Sirena de Alerta: Este dispositivo emite una alarma en el momento que recibe una alerta; el sonido de la alarma es de 110 dB, puede también ser utilizado para alarma de otro tipo de detectores; utiliza Zigbee en la banda de 2.4 GHz y baterías de 12V – DC.

En la Tabla 2.2 se muestra el precio de cada uno de estos dispositivos en el mercado mundial, el rango en cuanto al precio se debe a que estos productos se adquieren en grandes cantidades, por lo que su valor varía de acuerdo a la compra realizada.

Producto	Precio (USD)
WZB-05ET	90 - 110
WZB-01USBR	70 - 90
SG-01-SK	44 - 60
WZB-SGB02	30 - 38
WZB-SPM05	45 - 60
A10	39 - 56

Tabla 2.2. Listado de precio de los productos de *DOW TECHNOLOGY ELECTRONICS TRADING CO L.L.C.*

2.6 Conclusiones del capítulo

Se puede concluir que en el diseño de una WSN para aplicaciones empresariales se deben tener en cuenta los siguientes criterios: estándar, banda de frecuencia, topología y protocolo de enrutamiento.

El despliegue de WSN para pequeñas y medianas empresas se realizará utilizando el estándar Zigbee, la topología en malla, la banda de los 2.4 GHz y AODV como protocolo de enrutamiento.

Los elementos de hardware del fabricante *DOW TECHNOLOGY ELECTRONICS TRADING CO L.L.C* se recomiendan usarlos para WSN empresariales; sus precios oscilan entre 39 y 110 USD.

CAPÍTULO 3. EVALUACIÓN DEL DESEMPEÑO DE IWSN MEDIANTE DIFERENTES CASOS DE ESTUDIO

En este capítulo se evalúa el desempeño para dos Casos de Estudio: pequeñas y medianas empresas, mediante la herramienta OPNET Modeler 14.5. Los parámetros que se tienen en cuenta son: razón de transferencia exitosa, carga, demora, tráfico recibido y tráfico enviado; la evaluación se realiza con algunos nodos de la red como: Coordinador, *Router* y Dispositivos Finales; finalmente se comparan los Casos de Estudio 1 y 2.

3.1 Caso de Estudio 1: WSN para pequeñas empresas

El Caso de Estudio 1 es una WSN para pequeñas empresas como se muestra en la Figura 3.1, la misma cuenta con 1 Coordinador Central, 5 *Routers* y 20 Dispositivos Finales que representan los sensores. El despliegue se realizó utilizando el estándar Zigbee, la banda de los 2.4 GHz y la topología en malla como se recomendó en los epígrafes 2.1, 2.2 y 2.3; el protocolo de enrutamiento AODV nos es posible implementarlo en el OPNET Modeler 14.5.

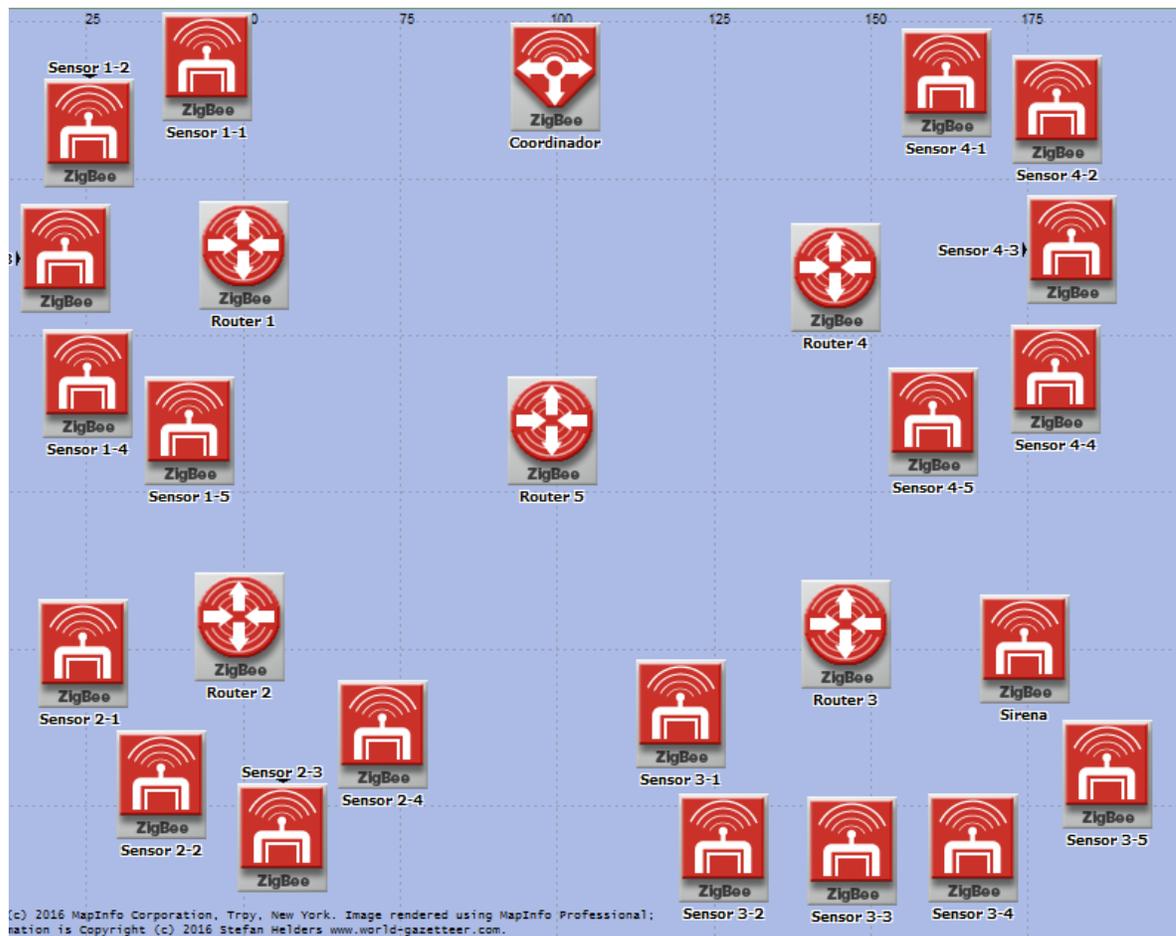


Figura 3.1. Despliegue de la WSN para pequeñas empresas.

En la red WSN desplegada el *Router 5* se utiliza para aumentar la redundancia en la red, sirviendo para encaminar la comunicación en caso de fallos; los *Routers 1* hasta el *4* atenderán cada uno a los sensores que se le asignaron. Los dispositivos que se muestran en la Figura 3.1 representan los elementos de hardware descritos en el epígrafe 2.5.

A cada elemento de la red se le debe configurar los parámetros de la capa física y MAC, además el tráfico en la capa de aplicación; en el caso del Coordinador Central se le define también las características de la capa de red. En la Figura 3.2, se muestran los atributos del Coordinador Central de la red.

Attribute	Value
name	Coordinador
ZigBee Parameters	
MAC Parameters	
ACK Mechanism	(...)
Status	Enabled
ACK Wait Duration (seconds)	0.01
Number of Retransmissions	5
CSMA-CA Parameters	
Minimum Backoff Exponent	3
Maximum Number of Backoffs	4
Channel Sensing Duration	0.1
Physical Layer Parameters	
Data Rate	250000
Packet Reception-Power Threshold	-85
Transmission Bands	
2450 MHz Band	Enabled
915 MHz Band	Disabled
868 MHz Band	Disabled
Transmit Power	0.001
Network Parameters	
Beacon Order	6
Superframe Order	0
Maximum Children	25
Maximum Routers	5
Maximum Depth	5
Beacon Enabled Network	Disabled
Mesh Routing	Enabled
Route Discovery Timeout	10
PAN ID	1
Application Traffic	
Destination	All Coordinators and Routers
Packet Interarrival Time	constant (60)
Packet Size	constant (1024)
Start Time	uniform (20, 21)
Stop Time	Infinity

Figura 3.2. Configuración del Coordinador Central de red.

La configuración de los sensores con respecto al Coordinador y los *Routers* cambia en cuanto al destino del tráfico, en cada caso se comunicará con el *Router* que le fue asignado; la Figura 3.3, muestra un ejemplo para el caso del Sensor 1-1.

Application Traffic	
Destination	Router 1
Packet Interarrival Time	constant (60)
Packet Size	constant (1024)
Start Time	uniform (20, 21)
Stop Time	Infinity

Figura 3.3. Configuración del tráfico de la capa de aplicación del Sensor 1-1.

Antes de que se puedan analizar los resultados es preciso seleccionar las estadísticas deseadas para el análisis y los parámetros de la simulación, estos parámetros se muestran en la Figura 3.4 a-) y b-).

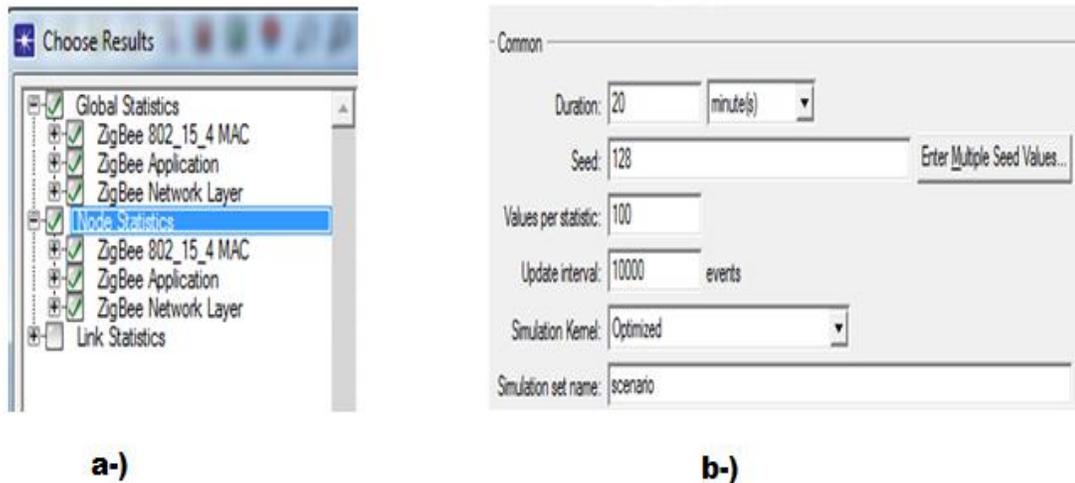


Figura 3.4. a-) Estadísticas seleccionadas para la simulación y b-) Parámetros de la simulación.

3.1.1 Análisis de los resultados

El análisis de los resultados de la simulación se hará teniendo en cuenta métricas de desempeño como son: razón de transferencia exitosa (Throughput), carga (Load), demora (Delay), tráfico recibido (Traffic Received) y tráfico enviado (Traffic Sent). En el análisis se tomarán algunos de los elementos de la red, donde se demuestre el correcto funcionamiento de toda la WSN para pequeñas empresas.

En la Figura 3.5, se muestra el *Throughput* (bps) del Coordinador Central de la Red en la capa MAC, se puede observar que el mismo varía entre los 6.5 kbps y 4.1 kbps, inicialmente su valor fue de 11.9 kbps.

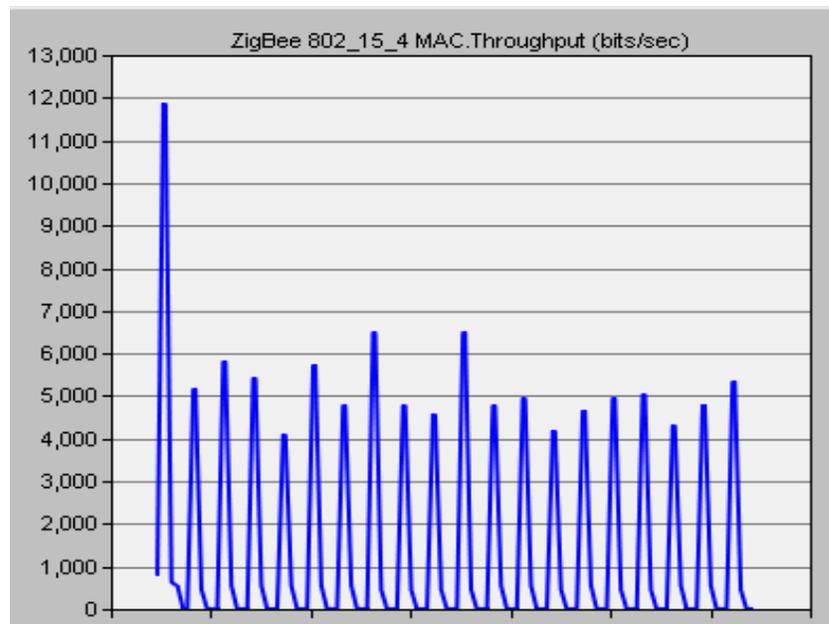


Figura 3.5. *Throughput* (bps) del Coordinador Central de la Red en la capa MAC.

La demora promedio en la capa MAC del Coordinador es variable, transcurrido los 20 minutos era de 43 ms como se muestra en la Figura 3.6, este valor inicialmente era de 128 ms; este valor más alto se debe al proceso de establecimiento de la red, en donde se establecen las rutas y cada sensor se asocia al *Router* correspondiente.

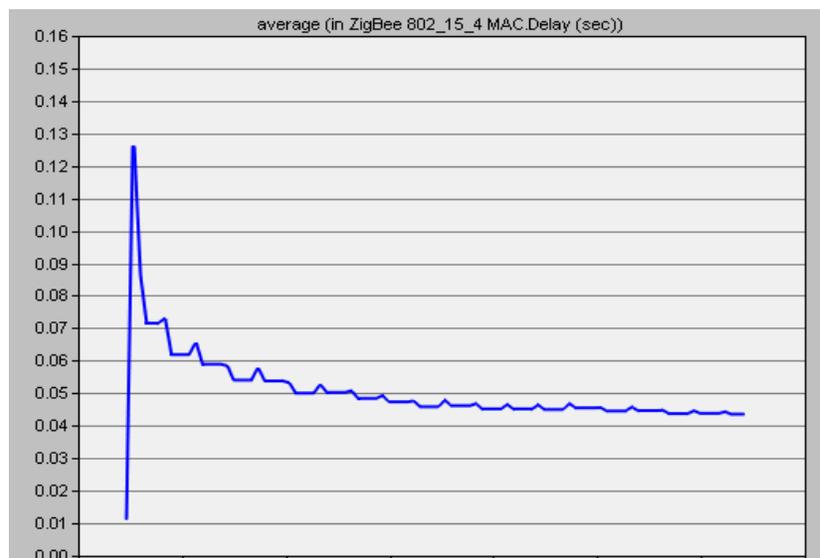


Figura 3.6. Demora promedio (seg) en la capa MAC del Coordinador.

En la Figura 3.7 se muestra una comparación entre el tráfico recibido y enviado en la capa de aplicación en el Coordinador, en ella se muestra como en el Coordinador el tráfico recibido (425 bps) es mayor que el enviado (85 bps), esto se debe a que todo el tráfico de los *Routers* es enviado hacia él.

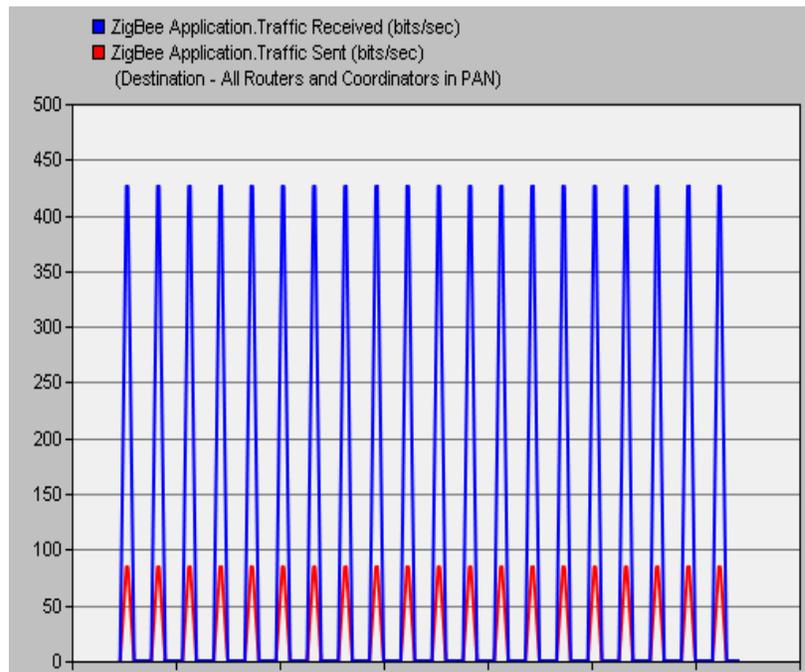


Figura 3.7. Comparación entre el tráfico recibido y enviado (bps) en la capa de aplicación del Coordinador.

En la Figura 3.8 se puede observar una comparación de la demora promedio en la capa MAC entre el Coordinador, el *Router 2* y el Sensor 2-3, en donde se muestra que la demora promedio en el Sensor 2-3 es 20 ms, menor que los 30 ms del *Router 2* y 43 ms del Coordinador. Los valores antes mostrados se debe a que el nodo sensor solo compite con los demás sensores que estén asociados a su mismo *Router*, mientras que el *Router 2* tiene que hacerlo con los demás *Routers*, donde el tráfico es mayor y por su parte el Coordinador recibe la carga de toda la red y por lo tanto las demoras son las mayores.

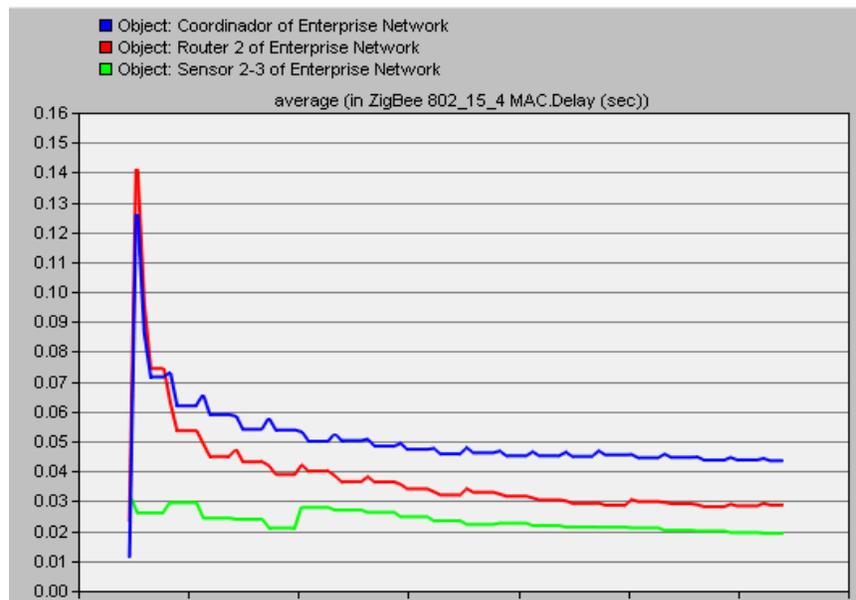


Figura 3.8. Comparación de la demora promedio (seg) en la capa MAC entre el Coordinador, *Router 2* y Sensor 2-3.

La carga en la capa MAC es 1.72 kbps, 1.18 kbps y 95 kbps para el Coordinador, *Router 2* y Sensor 2-3 respectivamente como se muestra en la Figura 3.9. Aquí se puede apreciar que el Coordinador asume la mayor carga de toda la red.

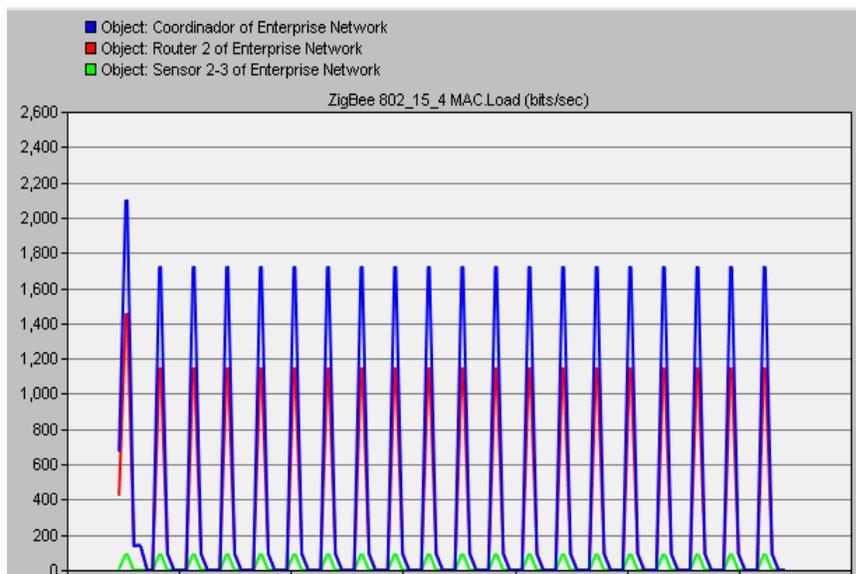


Figura 3.9. Comparación de la carga (bps) en la capa MAC entre el Coordinador, *Router 2* y Sensor 2-3.

3.2 Caso de Estudio 2: WSN para medianas empresas

El Caso de Estudio 2 es una WSN para medianas empresas como se muestra en la Figura 3.10, esta red cuenta con 1 Coordinador Central, 7 *Routers* y 38 Dispositivos Finales. El despliegue se realizó utilizando el estándar Zigbee, la banda de los 2.4 GHz y la topología en malla. Al igual que para el Caso de Estudio 1, el protocolo de enrutamiento AODV no es posible implementarlo en el OPNET Modeler 14.5.

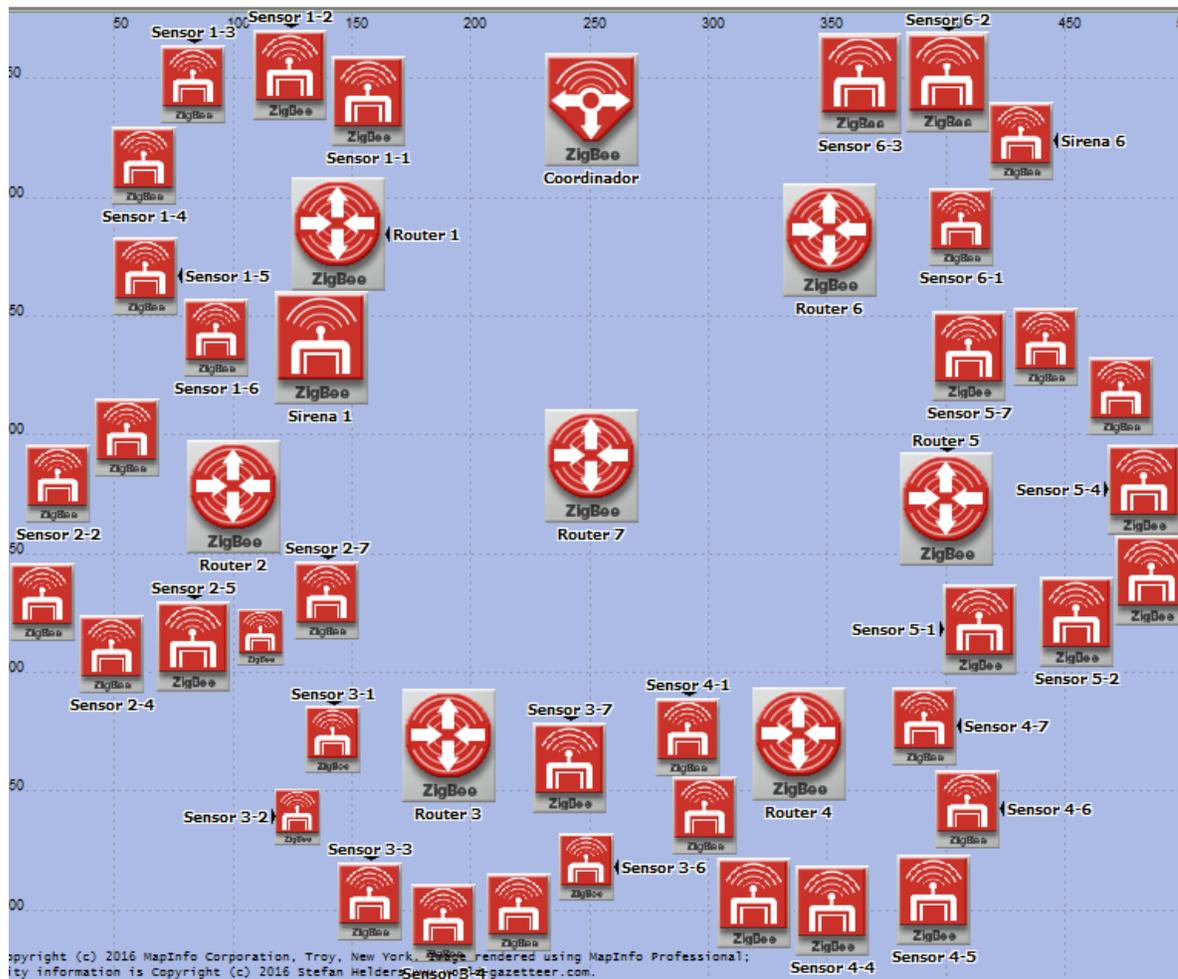


Figura 3.10. Despliegue de la WSN para medianas empresas.

En la red WSN desplegada el *Routers* 7 se utiliza para aumentar la redundancia en la red; los *Routers* 1 hasta el 6 atenderán cada uno a los sensores que se le asignaron. Al igual que para el Caso de Estudio 1 los dispositivos representan los elementos de hardware descritos en el epígrafe 2.5.

En la configuración de los dispositivos se utilizó la misma que la Figura 3.2, solo que esta vez se modificaron los valores de la capa de red, adaptándolos a la nueva red. Los cambios se muestran en la Figura 3.11. Igualmente el destino del tráfico de cada sensor se configuró según el *Router* al cual él le envía sus datos; los parámetros de tiempo de simulación y las estadísticas deseadas para el análisis se mantuvieron sin variación respecto a las definidas para el Caso de Estudio 1.

Network Parameters (...)	
Beacon Order	6
Superframe Order	0
Maximum Children	46
Maximum Routers	7
Maximum Depth	5
Beacon Enabled Network	Disabled
Mesh Routing	Enabled
Route Discovery Timeout	10
PAN ID	1

Figura 3.11. Configuración de los parámetros de red para el Caso de Estudio 2.

3.2.1 Análisis de los resultados

La Figura 3.12, muestra el *Throughput* (bps) del Coordinador Central de la Red en la capa MAC, se puede observar que el mismo varía entre los 4.2 kbps y 2.2 kbps.

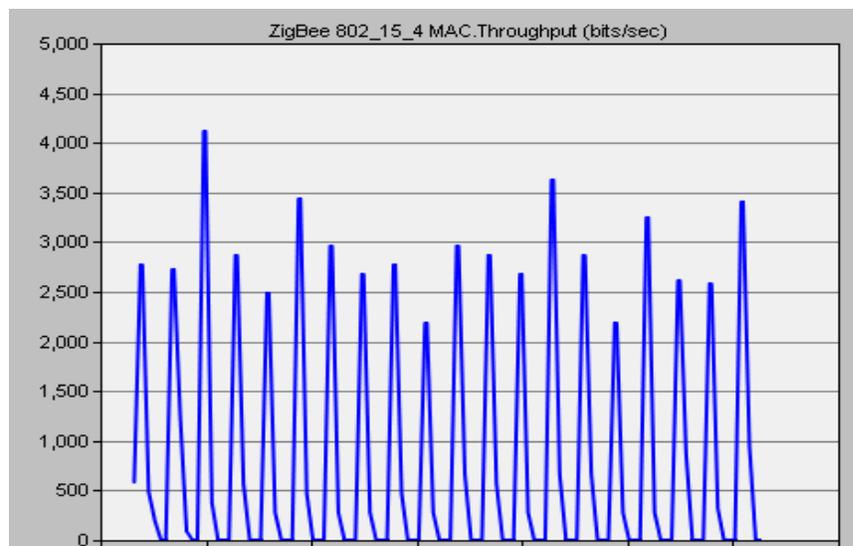


Figura 3.12. *Throughput* (bps) del Coordinador Central de la Red en la capa MAC.

La demora promedio en la capa MAC del Coordinador es variable, durante el proceso de establecimiento de la red era de 92 ms, transcurrido los 20 minutos era de 48 ms como se muestra en la Figura 3.13.

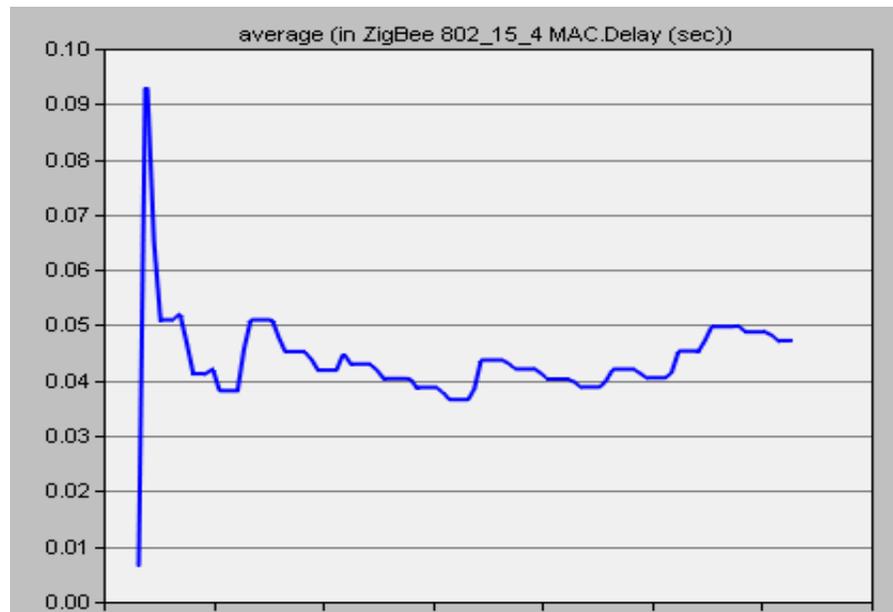


Figura 3.13. Demora promedio (seg) en la capa MAC del Coordinador.

En la Figura 3.14 se muestra una comparación entre el tráfico recibido y enviado en la capa de aplicación en el *Router 7*, el tráfico recibido por el *Router 7* es 600 bps y el tráfico enviado es 85 bps, esto se debe a que por este *Router* es enviado tráfico de todos los otros *Routers*, ya que este sirve para garantizar la redundancia en la topología en malla.

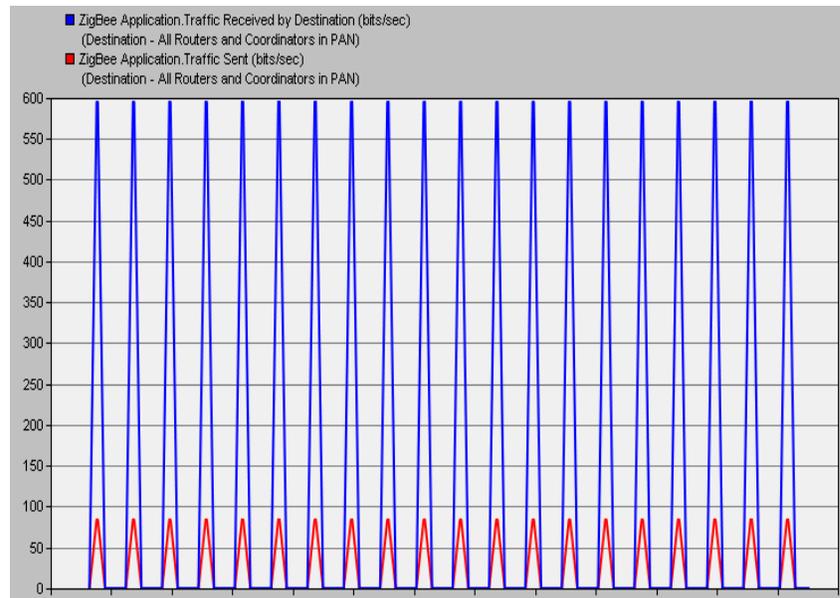


Figura 3.14. Comparación entre el tráfico recibido y enviado (bps) en la capa de aplicación del *Router 7*.

En la Figura 3.15 se puede observar una comparación de la demora promedio en la capa MAC entre el Coordinador, el *Router 2* y el Sensor 2-4, la demora promedio en el Sensor 2-4 es 28 ms, en el *Router 2* es de 36 ms y en el Coordinador 48 ms.

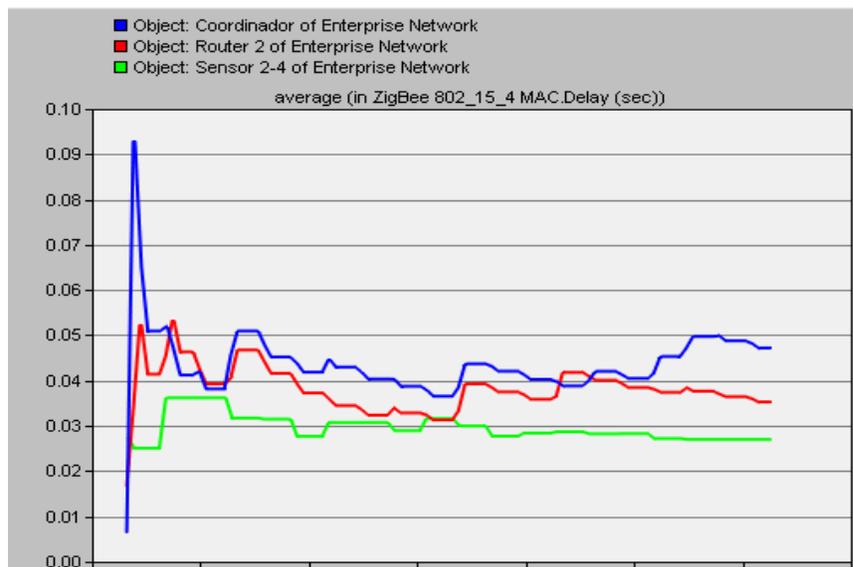


Figura 3.15. Comparación de la demora promedio (seg) en la capa MAC entre el Coordinador, *Router 2* y Sensor 2-4.

La Figura 3.16 muestra una comparación en cuanto a la carga en la capa MAC entre el Coordinador, el *Router 2* y el Sensor 2-4; en el caso del Coordinador y el *Router 2* sus valores son variables, para el primer caso oscila entre 1.6 kbps y 1.17 kbps, mientras que para el segundo caso varía entre 1 kbps y 790 bps. En el Sensor 2-4 la carga es de 95 bps.

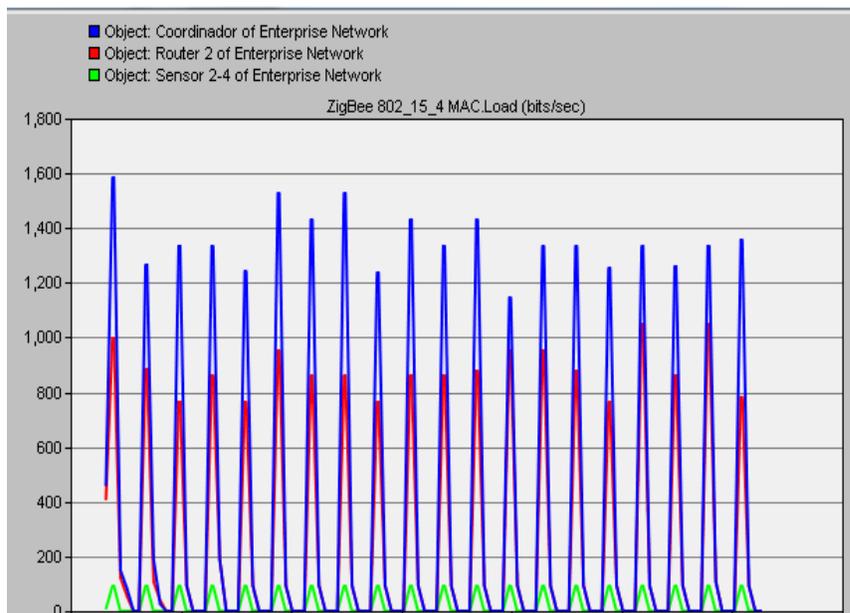


Figura 3.16. Comparación de la carga (bps) en la capa MAC entre el Coordinador, *Router 2* y Sensor 2-4.

3.3 Comparación entre el Caso de Estudio 1 y 2

Luego de que se hayan analizado los Casos de Estudio 1 y 2, en este epígrafe se pretende compararlo entre ellos, analizando el desempeño a partir de las estadísticas globales de cada red.

En la Figura 3.17 se muestra la carga (bps) en la capa MAC entre los Casos de Estudio 1 y 2; se puede apreciar que para el Caso de Estudio 2 la carga es entre 11 kbps y 12.6 kbps, mientras que para el Caso de Estudio 1 se comporta entre 7.6 kbps y 8.8 kbps; esto se debe a que en el caso de Estudio 2 intervienen una mayor cantidad de dispositivos, los cuales generan cada uno su propia carga a la red; por tal motivo la carga en cada *Router* es mayor, así como en el Coordinador Central de la red.

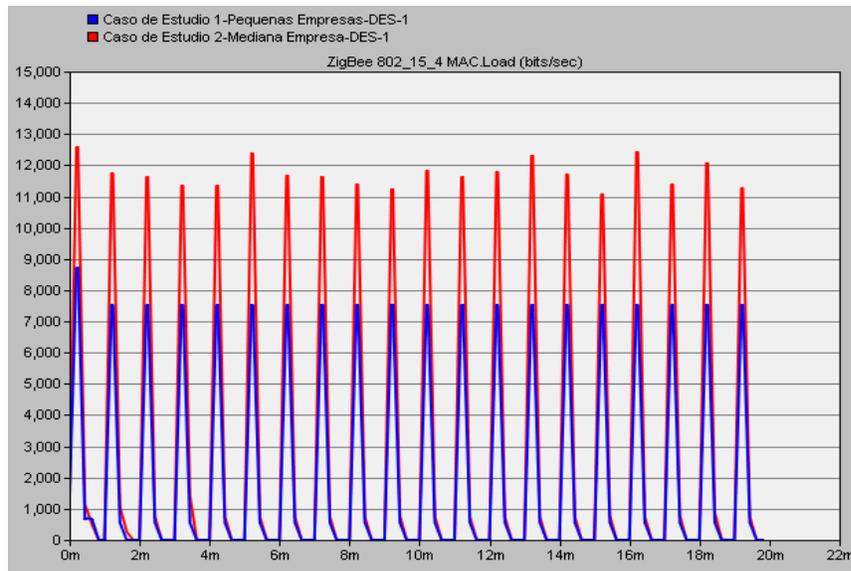


Figura 3.17. Comparación de la carga en la capa MAC entre los Casos de Estudio 1 y 2.

La Figura 3.18 muestra la demora (seg) en la capa MAC entre los Casos de Estudio 1 y 2, en el Caso de Estudio 2 la demora es de 0.59 ms, mientras que para el Caso de Estudio 1 es 0.38 ms; pues como se observa en la Figura 3.17, la carga en esta red es mayor y por tanto esto influye en la demora total de la red.

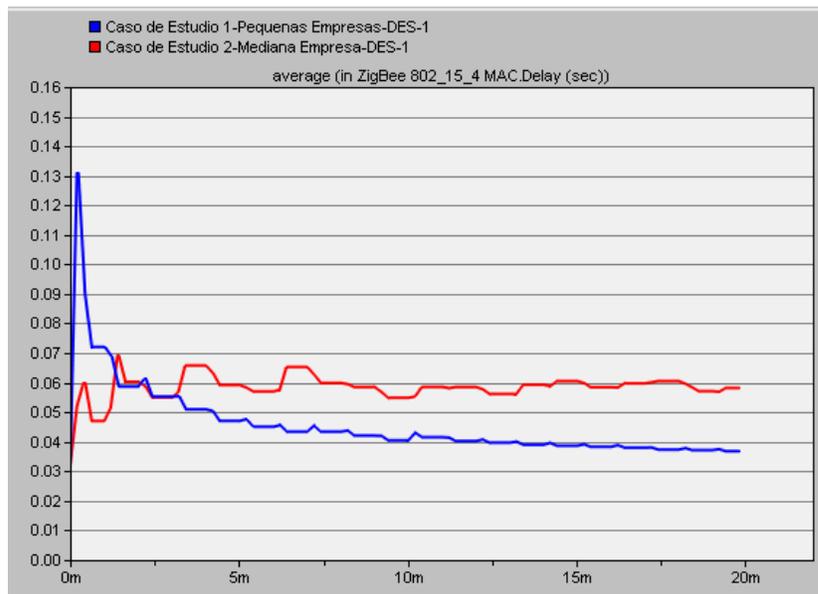


Figura 3.18. Comparación de la demora en la capa MAC entre los Casos de Estudio 1 y 2.

3.4 Conclusiones del capítulo

Se puede concluir luego de la evaluación del desempeño para los dos Casos de Estudio que:

En el Caso de Estudio 1 el *throughput* varía entre los 6.5 kbps y 4.1 kbps y la demora transcurrido los 20 minutos era de 43 ms en la capa MAC del Coordinador. El tráfico recibido era de 425 bps y el tráfico enviado de 85 bps en capa de aplicación del Coordinador; mientras que la demora y la carga es mayor en Coordinador que en el *Router* 2 y el Sensor 2-3.

En el Caso de Estudio 2 el *throughput* varía entre los 4.2 kbps y 2.2 kbps y la demora transcurrido los 20 minutos era de 48 ms en la capa MAC del Coordinador. El tráfico recibido era de 600 bps y el tráfico enviado de 85 bps en capa de aplicación del *Router* 7; mientras que la demora y la carga es mayor en Coordinador que en el *Router* 2 y el Sensor 2-4.

La carga y la demora para el Caso de Estudio 2 es mayor que para el Caso de Estudio 1, comportándose la carga entre 11 kbps y 12.6 kbps y la demora en 0.59 ms para el Caso de Estudio 2, mientras que para el Caso de Estudio 1 la carga se comportaba entre 7.6 kbps y 8.8 kbps y la demora en 0.38 ms.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Conclusiones

Las IWSNs están caracterizadas por bajas razones de transmisión de datos, hasta 250 kbps; se desarrollan tomando como base al estándar IEEE 802.15.4 y estas redes pueden integrarse a otras redes ya existentes como WiFi y Ethernet; tienen gran aplicabilidad en esferas como: la automatización industrial, de edificios y la domótica.

Para el diseño de una IWSN se han seguido los siguientes criterios: selección del estándar, la banda de frecuencia, la topología y el protocolo de enrutamiento; además se eligieron los elementos de *hardware* a utilizar. Las IWSNs propuestas están caracterizadas por el empleo del estándar Zigbee, la banda de 2.4 GHz, la topología en malla y el protocolo de enrutamiento AODV.

Se proponen dos Casos de Estudio para WSN empresariales, uno para pequeñas empresas y otros para medianas empresas; se evalúa el desempeño utilizando los parámetros: *throughput*, carga, demora, tráfico recibido y tráfico enviado haciendo uso del OPNET Modelr 14.5.

Para el Coordinador Central de la Red en la capa MAC es mayor la demora y menor el *throughput* en el Caso de Estudio 2 con respecto al Caso de Estudio 1, mientras que la evaluación de toda la red mostró que en el Caso de Estudio 2 la demora y la carga es mayor que en el Caso de Estudio 1.

Recomendaciones

Para nuevas investigaciones se recomienda:

Evaluar el desempeño de las WSN para pequeñas y medianas empresas en escenarios reales y compararlos con los que se obtuvieron mediante la simulación.

Proponer una WSN para pequeñas y medianas empresas siguiendo criterios diferentes a los que se definieron y evaluar el desempeño de la misma.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABDUL KAREEM SHAIK, C. A. K., DR. MADHAR SAHEB SHAIK 2015. Implementation of Wireless Sensor Networks for Industrial Applications Using The Multi-Core Architecture. *IEEE*, 5.
- ARAQUE MENA, C. G. & SÁNCHEZ JÁCOME, C. D. 2012. *Diseño e implementación de un sistema domótico inalámbrico basado en el protocolo de redes de comunicación Zigbee y sistema de supervisión HMI para la seguridad y eficiencia de consumo energético en hogares ecuatorianos*. LATACUNGA/ESPE/2012.
- BECERRA, J. F. 2013. *AUTOMATIZACIÓN, CONTROL Y SUPERVISIÓN REMOTA DEL SISTEMA CENTRAL DE AIRE ACONDICIONADO (AGUA HELADA) PARA UN EDIFICIO*.
- CANTOS SILVA, M. A. & GUEVARA LÓPEZ, E. D. 2014. Diseño e Implementación de una Red Industrial con Ethernet/IP. Caso Práctico: Laboratorio de Automatización de la Escuela de Ingeniería en Sistemas de la ESPOCH.[Incluye: Manual del Sistema de Monitoreo de la Red].
- DR. PETER HARROP, R. D. 2014. *Wireless Sensor Networks (WSN) 2014-2024: Forecasts, Technologies, Players* [Online].
- ESCÁMEZ SÁNCHEZ, F. 2014. *Proyecto de automatización de red multi-protocolo: profibus, profinet y As-I para control industrial en el laboratorio de máquinas eléctricas*.
- FATA, O. A. 2011. *Redes de sensores*. Facultad de Informática.
- GABER, M. I., MAHMOUD, I. I., SEDDIK, O. & ZEKRY, A. 2015. Comparison of Routing Protocols in Wireless Sensor Networks for Monitoring Applications. *International Journal of Computer Applications*, 113.
- GARBARINO, J. & ECHEVERRÍA, A. 2011. *Protocolos para redes inalámbricas de sensores*. Tesis de maestría, Universidad de Buenos Aires.
- GUBBI, J., BUYYA, R., MARUSIC, S. & PALANISWAMI, M. 2013. Internet of Things (IoT): A vision, architectural elements, and future directions. *Future Generation Computer Systems*, 29, 1645-1660.
- GUNGOR, V. C. & HANCKE, G. P. 2009. Industrial wireless sensor networks: Challenges, design principles, and technical approaches. *Industrial Electronics, IEEE Transactions on*, 56, 4258-4265.

- KAOUTAR, E., MOHAMMED, P. M. & BOUCHAIB, P. N. 2014. Zigbee Routing Opnet Simulation for a Wireless Sensors Network. *International Journal of Advanced Computer Science & Applications*, 1, 151-154.
- LAMARCA, M. 2013. Historia de Internet. *Disponible on line: http://www.hipertexto.info/documentos/h_internet.htm*.
- LINO RAMIREZ, C. 2012. *Diseño de una arquitectura para redes de sensores con soporte para aplicaciones de detección de eventos*.
- MORENO, J. & RUÍZ, D. 2007. Informe Técnico: Protocolo ZigBee (IEEE 802.15. 4). *Disponible en [Acceso 31 de octubre del 2013]*.
- MUÑOZ CASTEJÓN, R. 2011. Interconexión de redes de sensores inalámbricos 802.15. 4 en localizaciones remotas.
- ORFANUS, D., INDERGAARD, R., PRYTZ, G. & WIEN, T. EtherCAT-based platform for distributed control in high-performance industrial applications. *Emerging Technologies & Factory Automation (ETFA), 2013 IEEE 18th Conference on, 2013. IEEE, 1-8*.
- PACHECO MENÉNDEZ, A. 2015. *Propuesta de una Red Inalámbrica de Sensores para Edificios Docentes*. Universidad Central" Marta Abreu" de Las Villas.
- RAMIREZ, C. D., SANABRIA BOCANEGRA, R. & SUAREZ SIERRA, M. 2011. Integración de sensores inalámbricos y domótica.
- RAMÍREZ, F. J. S. 2014. *Diseño de un sistema domótico para el control de la iluminación de una vivienda unifamiliar usando el protocolo ModBus RTU*. Pontificia Universidad Católica del Perú, Facultad de Ciencias e Ingeniería. Mención: Ingeniería Electrónica.
- SALGADO, I. V. 2012. ZigBee y sus aplicaciones. Obtenido de <http://www.dea.icaei.upco.es/sadot/Comunicaciones/avanzadas/Zigbeeysusaplicaciones.pdf>.
- TUSTÓN TORRES, I. 2012. Evaluación del Rendimiento del Estándar IEEE 802.15. 4 (ZIGBEE) en Entornos de Interferencia.

ANEXOS

Anexo I Hojas de Especificaciones de los Dispositivos



WZB-05ET Coordinator ZigBee – Convertidor a Ethernet

Protocolo de Transmisión	UART: Modbus RTU / ZigBee: perfil HA
Protocolo de red	IEEE802.15.4 / ZigBee 2007 / PRO
Chip-Set	TI / C2530F256, 256 flash SoC
Potencia RF	18dBm
Frecuencia de Operación	2.4 GHz
Sensibilidad del receptor	-92dBm
Velocidad en baudios	9600, 19200, 38400, 57600, 11520 bps
Alcance de transmisión	500 m / 1640 pies (línea de visión)
Velocidad de transmisión	Max: 250kbps
Consumo de Potencia	0.8 W
Interfaz de salida	USB
Antena	2dBi Omnidireccional SMA
Topología de red	Estrella / Árbol de grupos / Malla
Intervalo de transmisión	Siempre espera
Auto Reconexión	Sí

Temperatura de trabajo	-10 ~ +80°C, 90% máx de humedad relativa)
Sistema Operativo	Windows 95/ 98/ NT/ 2000/ XP/ Vista/ Win7
Dimensión	62mm x 42mm x 15mm
Peso	52 g



WZB-01USBR Router ZigBee o Repetidor mediante USB

Protocolo Transmisión	de	UART: Modbus RTU / ZigBee: perfil HA
Protocolo de red		IEEE802.15.4 / ZigBee 2007 / PRO
Chip-Set		TI / C2530F256, 256 flash SoC
Potencia RF		18dBm
Sensibilidad del receptor		-92dBm
Alcance de transmisión		500 m / 1640 pies (línea de visión)
Velocidad transmisión	de	Max: 250kbps
Frecuencia de Operación		2.4 GHz
Velocidad en baudios		Configurable (por defecto 9600 891)
Interfaz de salida		USB
Parámetro		Velocidad de transferencia PAN, ID, Canal RF Configurable
Topología de red		Estrella / Árbol de grupos / Malla
Intervalo de transmisión		Siempre espera
Auto Reconexión		Sí
Temperatura de trabajo		-20 ° C ~ 70 ° C / -4C ~ 158C (Max 90% de humedad relativa)
Sistema Operativo		Windows: 2000, XP, Vista, Win7, Win8

Dimensión	75mmX34mmX10mm
Peso	25 g / 0,9 oz



SG-01-SK Detector de Humo Fotoeléctrico Residencial

Tecnología de detección	detección fotoeléctrica
Fuente de Alimentación	3 V DC batería (CR123A)
Sonido de Alarma	indicación de alarma 80 dB
Comunicación RF	ZigBee
Protocolo de RF	Estándar ZigBee Domótica
Banda De RF	2.40 ~ 2.48 GHz
RF Comprobar Vivo	cada 30 segundos (Ajustable)
RF Distancia de Transmisión	50 Metros (espacio Abierto)
Temperatura ambiente	0 ~ 50 ° C/+ 32 ~ + 122 ° F
Material	UL 94_V0 protección contra incendios material
Dimensiones	100mm x 40mm
Peso	117g (con la batería); batería: 15.6g
Color	blanco
Indicación de luz	LED: encendido, prueba, espera/Normal, alarma, mal funcionamiento
Área Eficaz de Alerta	Habitación Altura: <4 m-150 m ² Habitación Altura: 4 ~ 20 m-75 m ²



WZB-SGB02 Detector de Rotura de Cristal

Protocolo Inalámbrico	IEEE802.15.4 ZigBee 2007/PRO HA Perfil
Tipo de Dispositivo ZigBee	NIC Zona
Alcance de Transmisión	100 metros/328 pies (espacio libre)
Topología de red	Estrella, Árbol de Grupo, Malla
Reconexión Automática	recuperación automática cuando se desconecta
Fuente de Alimentación	Batería Inferior de Litio (CR2032)
Vida de la Batería	Más de 1 año (estado basado en entorno real)
Consumo	Modo de suspensión: 1.4 uA, Transmisión 35 mA
Tiempo de Mantenimiento (activado)	3 ~ 10 segundos
Entorno de funcionamiento	-10 ~ + 55 ° C/+ 14 ~ + 131 ° F, 0 ~ 95% RH
Peso	14.6g
Dimensiones	34 mm x 23mm x 10 mm



WZB-SPM05 Detector de Movimiento PIR

Tipo de Detección	Sensor de Movimiento PIR
Rango de detección	9 m
Altura de Instalación	2.0 a 2.5 m
Inmunidad Animal	Menor que 15 kg
Protocolo de transmisión	UART: Modbus RTU/ZigBee: HA perfil
Protocolo inalámbrico	IEEE 802.15.4, ZigBee2007/PRO
Alcance de Transmisión	100 metros/328 pies (línea de vista)
Frecuencia de Operación	2.4 GHz Banda ISM
Potencia de Salida RF	1 mW/dbm
Sensibilidad del Receptor	-92dBm
Fuente de Alimentación	3 V 1 x CR123A batería
Consumo de energía	TX: 35mA Sueño: 1.3uA
Modo de Ahorro de Energía	El intervalo de la alarma cada 3 minutos. (por defecto)
Duración de la batería	1 año
Topología de red	Estrella/Árbol de Grupos/Malla
Entorno de Funcionamiento	-10 ~ + 50 ° C/+ 14 ~ + 122 ° F, 0 ~ 75% RH
Dimensiones	95 mm x 64 mm x 49 mm
Peso	92g/3.25 oz con batería



A10 Sirena de Alerta

Protocolo de transmisión	UART: Modbus RTU/ZigBee: HA perfil
Protocolo inalámbrico	IEEE 802.15.4, ZigBee2007/PRO
Alcance De transmisión	100 metros/328 pies (espacio libre)
Frecuencia De operación	2.4 GHz Banda ISM
Potencia De Salida RF	1 mW/dbm
Sensibilidad del receptor	2.4 GHz Banda ISM
Consumo de energía	TX: 35mA Sueño: 1.3uA
Alarma (dB)	110 dB @ 1 m
Topología de red	Estrella/Árbol de grupos/Malla
Fuente de Alimentación	DC 12 V
Entorno de funcionamiento	-10 ~ + 50 ° C/+ 14 ~ + 122 ° F, 0 ~ 75% RH
Dimensiones	91 mm x 66 mm x 42.5 mm
Peso	92g/3.25 oz con batería

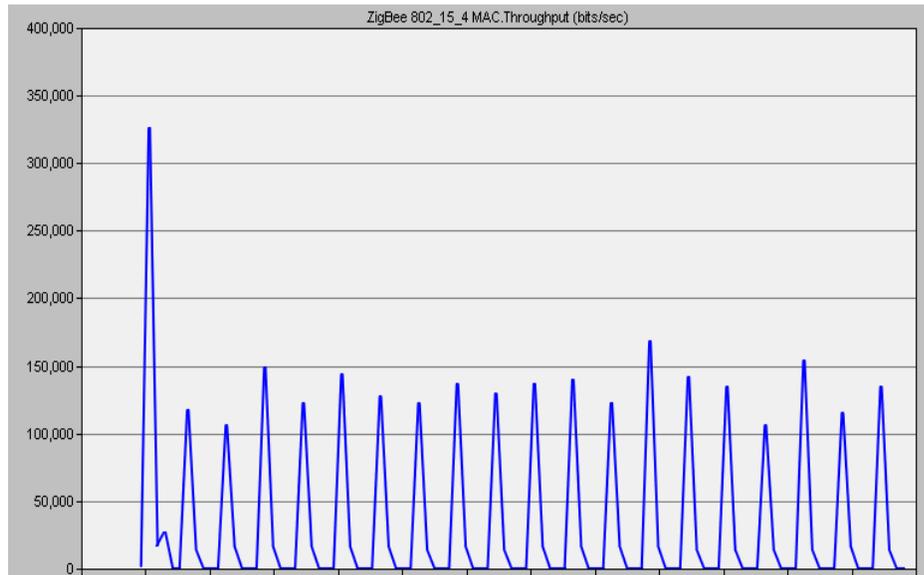
Anexo II Resultados secundarios de la simulación

Figura A.1. *Throughput* (bps) en la capa MAC de toda la red para el Caso de Estudio 1.

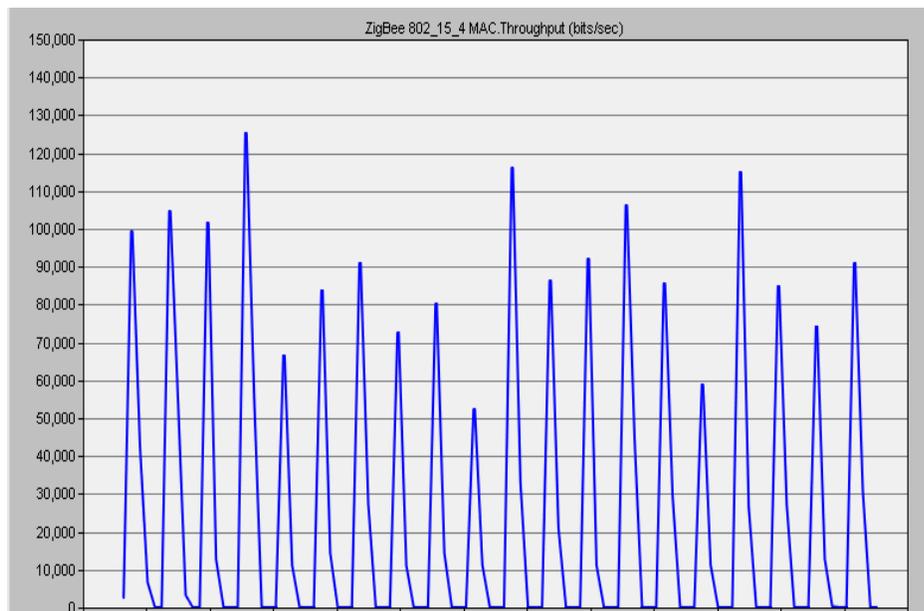


Figura A.2. *Throughput* (bps) en la capa MAC de toda la red para el Caso de Estudio 2.

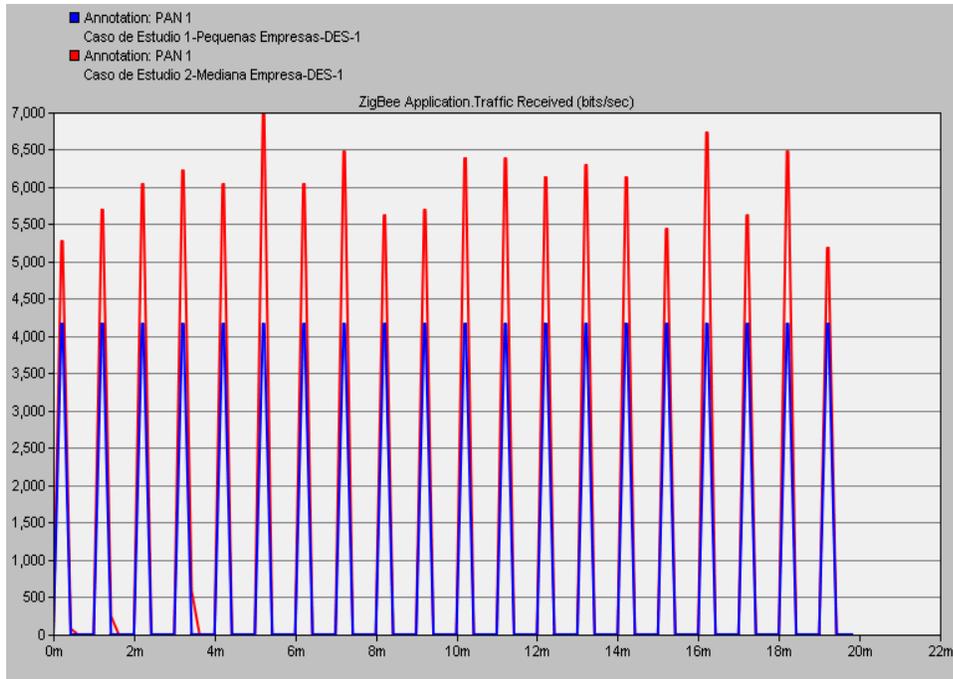


Figura A.3. Comparación del Tráfico Recibido (bps) en la capa de aplicación entre los Casos de Estudio 1 y 2.